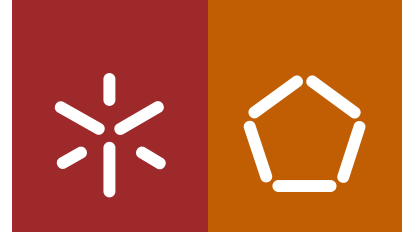




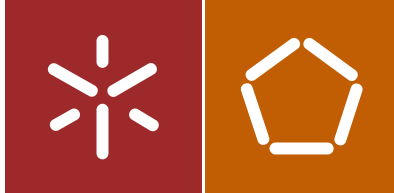
Marisa Daniela Martins da Silva

Comportamento de argamassas  
com incorporação de Material de Mudança  
de Fase não encapsulado submetidas a  
condições extremas

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Marisa Daniela Martins da Silva

Comportamento de argamassas  
com incorporação de Material de Mudança  
de Fase não encapsulado submetidas a  
condições extremas

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Barroso de Aguiar  
Doutora Sandra Raquel Leite da Cunha

## AGRADECIMENTOS

*Estes anos foram marcados por momentos de felicidade, motivação e conquistas, mas também de muitas angústias, incertezas e desilusões e é por estes sentimentos que muitas vezes nos sentimos derrotados e com vontade de desistir. Por isso nestas páginas quero agradecer aos que durante este percurso nunca deixaram que os momentos menos bons fossem suficientes para que não terminasse este capítulo da minha vida.*

Aos meus pais, que sempre me apoiaram neste percurso. Pai, por me incentivares a ser melhor e nunca me deixares desistir. Mãe por nunca ter ficado sozinha durante estes longos anos da minha vida. Todo o vosso esforço será recompensado.

A ti, Francisco meu irmãozinho, por me teres sempre arrancado sorrisos nos momentos mais difíceis e teres tornado mais leves todos estes anos.

A vocês, Tiago e Soraia, por estarem sempre ao meu lado e por me darem o melhor presente de todos: o meu Vicente.

Ao meu Carlitos, por todo o carinho, apoio e compreensão. Por me deixares trabalhar em tua casa tantas vezes para que não estivesse sozinha, mas principalmente, por me teres tornado mais forte. És o meu porto seguro, não podia ter tido mais sorte.

À minha família pelos incentivos e apoio incondicional, não poderia pedir melhor família. Principalmente à Catarina e Diana por tudo que sempre fizeram por mim e por todos os momentos de estudo na casa da nossa Avó. Levo comigo para a vida o maior ensinamento de todos: família é o maior tesouro que podemos ter. Que Deus nos ajude e nada nos separe. Obrigada às minhas três estrelinhas que me guiam pelo melhor caminho a partir do céu. Tia Mélia sei que está muito orgulhosa de mim. Recordo-me de todas as nossas conversas e do esforço que fez para que eu tivesse um futuro melhor (jamais a esquecerei).

Ana e Diana, por estes anos e pela amizade... Vocês são o que eu levo de melhor da melhor academia do país. Por acreditarem sempre em mim e por serem o meu braço direito e esquerdo nesta caminhada que sempre fizemos juntas. Desde 2012, mas para sempre.

Aos meus amigos por todo o apoio e compreensão. Em especial à Sandrina, Rita, Ana e Tita por todo o apoio, por serem o que eu precisava no momento certo. Vocês merecem o melhor da vida.



*Não são os que vêm no final que têm menos destaque e aqui queria, muito, agradecer a quem me ajudou a terminar esta dissertação. Foram meses de muito trabalho e dedicação e sem vocês não teria sido possível.*

Ao Professor Doutor José Barroso Aguiar, incrível orientador e ser Humano, que esteve sempre disponível e sempre se prontificou a ajudar em tudo. Pelas correções, ajudas e ensinamentos. Sem todo este apoio seria, com toda a certeza, impossível realizar esta dissertação. Trabalhar consigo foi das melhores decisões que tomei na universidade.

À Doutora Sandra Cunha deixo esta mensagem de orgulho: por toda a simpatia, dedicação, ajuda, por todas as sugestões, mas acima de tudo por todos os momentos de motivação. Foi um prazer trabalhar consigo. Por tudo isto e por ser uma amiga durante todo este trabalho nunca a esquecerei e desejo-lhe tudo de bom que a vida tem para dar. Muito sucesso é o que mais lhe desejo.

Ao Sr. Fernando Pokee e ao Carlos do Laboratório de Engenharia Civil. Sem vocês nada disto seria possível. Agradeço de coração.

À empresa Euroberço Construções Metálicas por me acolher e por entender, tão bem, a falta de tempo que esta dissertação me fez ter.

A toda a família Oriflame por me ter enchido sempre o coração e me ter ensinado o verdadeiro sentido de liderança, responsabilidade e organização.

A todos vocês, que de uma forma ou de outra estiveram do meu lado e me ajudaram a atingir este objetivo. O meu muito obrigada.

*“Quanto maior for o obstáculo, maior será a glória de tê-lo superado. “*

Jean Molière

## RESUMO

A utilização de materiais de mudança de fase em argamassas tem sido uma estratégia bastante estudada para a regulação da temperatura no interior dos edifícios, devido à capacidade de absorção e liberação de energia destes materiais o que permite uma melhoria da eficiência energética dos edifícios.

Muitos estudos, têm vindo a ser publicados utilizando Materiais de Mudança de Fase (PCM) macroencapsulado e microencapsulado. Contudo, a utilização de PCM nesta forma traduz-se em custos muito elevados e restringe a sua incorporação em determinados momentos de construção. Assim, a utilização de um PCM não encapsulado, através da sua incorporação direta em argamassas torna-se uma solução bastante interessante e competitiva, pois permite desenvolver argamassas com capacidade de regulação térmica a um custo significativamente mais baixo.

O principal objetivo deste trabalho consistiu no estudo do comportamento a temperaturas extremas de argamassas de cimento com incorporação de PCM não-encapsulado. Foi realizada a avaliação do comportamento destas argamassas a baixas temperaturas com recurso a ensaios de gelo-degelo enquanto que a avaliação do comportamento das argamassas a elevadas temperaturas foi efetuada com base em ensaios de determinação da resistência à flexão, compressão e aderência.

Neste trabalho foram desenvolvidas quatro composições distintas, aditivadas com diferentes teores de PCM, segundo a massa de agregado utilizado (0%, 5%, 10% e 20% de PCM). Os principais resultados obtidos durante a realização deste trabalho foram uma melhoria significativa, da resistência ao gelo-degelo com a adição do PCM livre na composição das argamassas e a diminuição da resistência a temperaturas elevadas tanto à flexão, compressão e aderência.

Concluiu-se que a incorporação direta de PCM líquido em argamassas poderá ser vista como uma solução económica e funcional para a melhoria do comportamento face ao gelo-degelo mantendo as suas características quando submetidas a altas temperaturas.

**Palavras Chave:** Argamassa, cimento, cinzas volantes, material de mudança de fase, temperaturas extremas.



## **ABSTRACT**

The use of phase change materials in mortars has been a well-studied strategy for regulating the temperature inside buildings due to the absorption and energy release capacity of these materials, which allows an improvement in the energy efficiency of buildings.

Many studies have been published using macroencapsulated and microencapsulated phase change materials (PCM). However, the use of PCM in this way translates into very high costs and restricts its incorporation at certain construction times. Thus, the use of a non-encapsulated PCM through its direct incorporation into mortars becomes a very interesting and competitive solution, since it allows to develop mortars with thermal adjustment capacity at a significantly lower cost.

The main objective of this work was to study the behavior at extreme temperatures of cement mortars with incorporation of non-encapsulated PCM. The behavior of these mortars at low temperatures was evaluated using ice-thaw tests, while the evaluation of the mortar behavior at high temperatures was carried out based on tests for the determination of the resistance to bending, compression and adhesion.

The main results obtained during this work were a significant improvement of the resistance to ice-thaw aggression with the addition of free PCM in the composition of the mortars and the decrease of the resistance to elevated temperatures both to the flexion, compression and adhesion.

In this work four different compositions were developed, with different PCM contents according to the aggregate mass used (0%, 5%, 10% and 20% of PCM). It was concluded that the direct incorporation of liquid PCM into mortars can be seen as an economical and functional solution for improving the energy efficiency of buildings.

It was concluded that the direct incorporation of liquid PCM into mortars could be seen as an economical and functional solution for the improvement of the behavior against the ice-defrost maintaining its characteristics when subjected to high temperatures.

**Keywords:** Mortar, cement, fly ash, phase change material, temperature extremes.



## LISTA DE ABREVIATURAS

PCM- Phase Change Materials

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

GEE – Gases Efeito Estufa

$CO_2$  – Dióxido de Carbono

INE – Instituto Nacional de Estatística

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.

LMA – Laboratório de Metrologia e Aviónicos

PTE – Plataforma Tecnológica Europeia

UE – União Europeia

EUA – Estados Unidos da América

MTE – Materiais para Tecnologias da Energia

AETCL – Armazenamento de energia térmica por calor latente

$^{\circ}C$  – Graus celsius

kJ – quilojoule

kg – quilograma

MJ – Megajoule

$m^2$ - metros quadrados

kW – quilowatt

h- hora

% - percentagem

$m^3$ - metros cúbicos

mm- milímetros

$mm^3$  – milímetros cúbicos

$mm^2$  – milímetros quadrados

cm – centímetros

m- metros

LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil

A/L- razão água ligante.

C – Cimento

CV – Cinzas Volantes

EN – Norma Europeia

C – Coeficiente de absorção capilar

M1 – Massa do provete em contacto com a água no instante 10 minutos

M2- Massa do Provete em contacto com a água no instante 90 minutos

Ai – Absorção de água por imersão

m1- massa do provete saturado ao ar

g- gramas

m2- massa hidrostática do provete saturado

m3- massa do provete seco

N – Newtons

$R_a$ - Aderência

MPa – Megapascal

F – Carga

A – Área de Teste

$R_f$ - Resistência à Flexão

b- base

d- largura

$R_c$ - Resistência à compressão

s- segundos

# ÍNDICE

<b>1- INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1- MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	4
1.2- ORGANIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS CONTEÚDOS .....	5
<b>2- ESTADO DO CONHECIMENTO.....</b>	<b>9</b>
2.1- GENERALIDADES .....	9
2.2- ENQUADRAMENTO HISTÓRICO .....	9
2.3- COMPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	10
2.4 - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	11
2.5- EVOLUÇÃO EM RELAÇÃO AO CONFORTO.....	13
2.6- ARGAMASSAS TÉRMICAS .....	14
2.6.1- <i>Vantagens e desvantagens das argamassas térmicas</i> .....	16
2.6.2 - <i>Desempenho mecânico de argamassas térmicas</i> .....	16
2.6.3- <i>Produção da Argamassa</i> .....	17
2.7- MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE .....	17
2.7.1- <i>Generalidades</i> .....	17
2.7.2- <i>Princípio de funcionamento de PCM</i> .....	18
2.7.3- <i>Classificação do PCM</i> .....	20
2.7.4- <i>Comparação entre os diferentes tipos de PCM</i> .....	21
2.7.5- <i>Vantagens e desvantagens da sua utilização</i> .....	21
2.7.6- <i>Métodos de Incorporação de PCM</i> .....	24
2.7.6.1- <i>Incorporação Direta</i> .....	24
2.7.6.2- <i>Encapsulamento</i> .....	25
2.7.6.3- <i>Estabilização</i> .....	26
2.7.6.4- <i>Imersão</i> .....	26
2.7.7- <i>Problemas na aplicação do PCM</i> .....	26
2.7.8- <i>PCM na envolvente da construção</i> .....	27
2.7.8.1- <i>PCM aplicado nas paredes</i> .....	28
2.7.8.2- <i>PCM em Pavimentos</i> .....	29
2.7.8.3- <i>PCM em Janelas</i> .....	30
2.7.8.4- <i>PCM em tetos</i> .....	30
<b>3- MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....</b>	<b>33</b>



3.1- MATERIAIS .....	33
3.1.1- Cimento Portland .....	33
3.1.2- Água .....	33
3.1.3- Agregados.....	34
3.1.4- Cinzas volantes.....	34
3.1.5- Material de Mudança de Fase (PCM) .....	34
3.2- COMPOSIÇÕES .....	35
3.3- PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ARGAMASSAS .....	36
3.3.1- Trabalhabilidade.....	37
3.3.2 – Absorção de água por capilaridade .....	38
3.3.3- Absorção de água por imersão .....	40
3.3.4- Massa Volúmica .....	41
3.3.5- Ensaio de Gelo-Degelo.....	41
3.4- PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS .....	42
3.4.1- Ensaio de Aderência.....	43
3.4.2- Resistência à flexão.....	44
3.4.3- Resistência à compressão.....	45
<b>4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
4.1- PROPRIEDADES FÍSICAS .....	49
4.1.1- Trabalhabilidade.....	49
4.1.2- Massa volúmica.....	50
4.1.3 – Absorção de água por capilaridade .....	50
4.1.4- Absorção de água por imersão .....	52
4.1.5- Gelo-degelo .....	54
4.2- PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	60
4.2.1- Comportamento à flexão e compressão .....	60
4.2.2- Aderência .....	63
<b>5- CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
5.1- TRABALHOS FUTUROS .....	70
<b>6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>
<b>7- ANEXOS.....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA POLUIÇÃO NA UE PARA O SETOR DA CONSTRUÇÃO (ADAPTADO DE [22]).	15
FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DO AUMENTO DO CALOR EM VÁRIAS REGIÕES DO MUNDO (ADAPTADO DE [25]).	15
FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (ADAPTADO DE [45]).	21
FIGURA 4 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA A E B, ADAPTADO DE [12].	35
FIGURA 5 - ENTALPIA DO PCM NÃO ENCAPSULADO [12].	36
FIGURA 6 - MOLDE TRONCÔNICO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE TRABALHABILIDADE.	38
FIGURA 7 - EXEMPLO DE CAROTAGEM E COLAGEM DE DISCOS METÁLICOS NO ENSAIO DE ADERÊNCIA.	44
FIGURA 8 - EXEMPLO DO ENSAIO DE FLEXÃO REALIZADO SOBRE PROVETE DE REFERÊNCIA.	45
FIGURA 9 – EXEMPLO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO REALIZADO SOBRE PROVETE DE REFERÊNCIA.	46
FIGURA 10 – RELAÇÃO ÁGUA/LIGANTE DAS ARGAMASSAS.	49
FIGURA 11 - RAZÃO LÍQUIDO/LIGANTE DAS ARGAMASSAS.	50
FIGURA 12 - VARIAÇÃO DA MASSA VOLUMICA.	51
FIGURA 13 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO CAPILAR.	51
FIGURA 14 - PORMENOR DO INTERIOR DOS PROVETES. A) CONTENDO 0% PCM NA SUA COMPOSIÇÃO. B) CONTENDO 5% DE PCM NA SUA COMPOSIÇÃO.	53
FIGURA 15 - PORMENOR DO INTERIOR DOS PROVETES. A) CONTENDO 10% PCM NA SUA COMPOSIÇÃO. B) CONTENDO 20% DE PCM NA SUA COMPOSIÇÃO.	53
FIGURA 16 - VARIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.	54
FIGURA 17 - EXEMPLO DOS ELEMENTOS DE ENSAIO DAS COMPOSIÇÕES À BASE DE CIMENTO 32.5NR.	54
FIGURA 18 - COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA CONTENDO 0% PCM AO ENSAIO GELO-DEGELO.	55
FIGURA 19 - PROVETES ADITIVADOS COM 0%PCM SUBMETIDOS AO ENSAIO GELO-DEGELO. A) PROVETES EM CICLO 2. B) PROVETES EM CICLO 17.	56
FIGURA 20 - COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA CONTENDO 5% PCM AO ENSAIO GELO-DEGELO.	56
FIGURA 21 - COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA CONTENDO 10% PCM AO GELO-DEGELO.	57

FIGURA 22 - APARECIMENTO DE FENDAS NOS PROVETES COM 5% E 10% PCM NA SUA COMPOSIÇÃO. ....	57
FIGURA 23 - COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA CONTENDO 20% PCM AO GELO-DEGELO..	58
FIGURA 24 - FISSURAS E PERDAS DE MASSA DOS PROVETES DA ARGAMASSA CONTENDO 20% DE PCM NA SUA COMPOSIÇÃO.....	58
FIGURA 25 - PERDA DE MASSA DAS ARGAMASSAS DURANTE OS ENSAIOS DE GELO-DEGELO.	59
FIGURA 26 - PERDAS DE MASSA OCORRIDAS DURANTE O ENSAIO DE GELO-DEGELO .....	61
FIGURA 27 - COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS SUJEITAS A TEMPERATURAS DE 20°C, 200°C, 400°C E 600°C.....	62
FIGURA 28 - COMPORTAMENTO À FLEXÃO DAS ARGAMASSAS SUJEITAS A TEMPERATURAS DE 20°C, 200°C, 400°C E 600°C.....	62
FIGURA 29 - ARGAMASSA À BASE DE CIMENTO SUBMETIDA A 600°C.....	65
FIGURA 30 - VARIAÇÃO DA ADERÊNCIA COM A ADIÇÃO DE PCM E COM A TEMPERATURA NAS ARGAMASSAS.....	65
FIGURA 31 - ROTURA NAS ARGAMASSAS À BASE DE CIMENTO QUANDO SUJEITAS A ENSAIOS DE ADERÊNCIA. ....	66

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS DE DESVANTAGENS DO PCM DE NATUREZA ORGÂNICA (ADAPTADO DE [12]). .....	22
TABELA 2 - VANTAGENS DE DESVANTAGENS DO PCM DE NATUREZA INORGÂNICA ADAPTADO DE [12]. .....	23
TABELA 3 - VANTAGENS DE DESVANTAGENS DO PCM DE MISTURAS EUTÉTICAS ADAPTADO DE [12]. .....	23
TABELA 4 - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND. ....	33
TABELA 5 - PROPRIEDADES DO PCM NÃO-ENCAPSULADO, ADAPTADO DE [12]. ....	36
TABELA 6 – FORMULAÇÃO DAS ARGAMASSAS (KG/m <sup>3</sup> ) .....	37
TABELA 7 - PLANIFICAÇÃO DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DURANTE AS PRIMEIRAS 24H. ....	39
TABELA 8 - PLANIFICAÇÃO DAS MEDIÇÕES DO ENSAIO GELO-DEGELO. ....	42
TABELA 9 - CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS SEGUNDO O COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE, COM BASE NA ESPECIFICAÇÃO NP EN 998-1:2010. ....	52
TABELA 10 - CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS ENDURECIDAS – RETIRADO DA NORMA NP EN 998-1:2010. ....	52
TABELA 11 - PERDAS DE MASSA OCORRIDAS DURANTE O ENSAIO DE GELO-DEGELO (%). ....	60
TABELA 12 - CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM RELAÇÃO À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PELA ESPECIFICAÇÃO NP EN 998-1:2010. ....	64



---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---



## 1- INTRODUÇÃO

A construção sustentável assume, cada vez mais, um papel relevante na sociedade. A população pretende gozar de uma construção durável, com melhorias quanto à sustentabilidade, de forma a diminuir os gastos na fatura da energia e não apenas minimizar os impactos ambientais [1].

Atualmente, o grande problema mundial centra-se no consumo desmesurado de energia proveniente de energias não renováveis, que provoca um grande impacto no meio ambiente. Sabendo que a indústria de construção ocupa um lugar de destaque no consumo de energia, torna-se imperativo atuar nesta problemática tentando minimizá-la ou eliminá-la [1].

Com o objetivo de diminuir o consumo energético, as argamassas térmicas surgem como uma solução bastante promissora pois possuem a capacidade de interagir com o ambiente de uma forma muito simples, mas bastante eficaz. Estas argamassas contêm materiais que mudam o seu estado em função da temperatura ambiente, aumentando o conforto dos ocupantes dos edifícios [2].

Todos os materiais da construção interagem com o ambiente, mas poucos são aqueles que melhoram o conforto térmico do edifício, diminuindo, simultaneamente, os impactos ambientais dos materiais de construção [3].

A utilização destas argamassas contribui para uma diminuição do consumo de energia associado ao ciclo de vida dos edifícios, tanto em custos iniciais de construção como de utilização. Assim, existem melhorias significativas na quantidade de energia consumida pelo edifício tornando-o mais eficiente a nível energético e ambiental. Estas argamassas têm na sua constituição Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials* - PCM) que funcionam como armazenadores e libertadores de energia sob a forma de calor proveniente do sol [3].

Os materiais de mudança de fase, possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta e passa o ponto de fusão do material, este passa do estado sólido para o estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica ambiente. Quando a temperatura ambiente



baixa o PCM reage de forma contrária passando do estado líquido para o sólido libertando a energia anteriormente armazenada [4].

Tendo em conta que a durabilidade dos materiais está também relacionada com a sustentabilidade, tendo em consideração, a diminuição de matérias-primas, resíduos e energia utilizada em operações de reabilitação, estas argamassas constituem uma inovação bastante interessante no setor da construção para se obterem soluções mais duráveis [4].

Contudo, a incorporação de materiais de mudança de fase em argamassas modifica algumas das suas principais características quer no estado fresco como endurecido [5].

A alteração das características deve ser avaliada ao longo da vida útil das argamassas. Estudos anteriores avaliam a alteração das características a curto prazo. No entanto, há poucos estudos sobre o comportamento a longo prazo, sobretudo quando as argamassas são submetidas a situações extremas [5].

Assim, existiu a motivação para o desenvolvimento desta dissertação e exploração deste material inovador de forma a avaliar o seu comportamento em situações extremas.

## **1.1- Motivação e objetivos**

Hoje em dia, a inovação é algo muito apreciado não só pelas empresas, mas pelo consumidor e também o conforto e a poupança ocupam um lugar considerável em toda a comunidade, muitas vezes antecipa até a inovação. Cada vez mais, é necessário que a inovação, o conforto e a poupança estejam interligados de forma a conseguirem ser um trio forte.

Vários são os estudos realizados que comprovam que as argamassas térmicas são uma aposta cada vez mais interessante pois conseguem aliar três pilares da construção: inovação, conforto e poupança.

Existem ainda estudos que comprovam que estas argamassas podem ser mais sustentáveis ao utilizar-se na sua composição resíduos industriais e substituindo o cimento Portland por cinzas volantes. Claro está que, por serem argamassas inovadoras existe a necessidade de estudar e ter em atenção muitos aspetos.

Esta dissertação surge de todos os factos acima referidos. Pretende-se colocar estas argamassas à prova de modo a confirmar se é viável a sua utilização na construção, aplicada em revestimentos interiores, tendo em conta todos os padrões a que estamos expostos hoje em dia. Se estas argamassas resistirem a temperaturas extremas terão, com toda a certeza, um bom funcionamento no interior dos edifícios.

Os objetivos deste trabalho são:

- Determinação das composições ótimas destas argamassas;
- Avaliação do comportamento a elevadas temperaturas de argamassas com incorporação de PCM.
- Avaliação da durabilidade da argamassa quando sujeita a ciclos de gelo-degelo.

O principal resultado que se espera deste trabalho é a otimização destas argamassas de modo a obter-se no final uma argamassa com características de regulação térmica do edifício e provar que esta argamassa é uma ótima solução para usar em revestimentos interiores em toda a construção nova e na reabilitação.

## **1.2- Organização e descrição dos conteúdos**

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos distintos e são eles: introdução, estado do conhecimento, materiais, composições e procedimentos de ensaio, resultados e discussão, conclusões.

No capítulo 1 é apresentada a motivação deste trabalho e objetivos e uma breve introdução a esta dissertação.

No capítulo 2 são abordados temas relacionados com a sustentabilidade e termos técnicos necessários para a realização deste trabalho. É neste capítulo que são apresentados os materiais de mudança de fase: o princípio de funcionamento, classificação, principais propriedades, como são incorporados na construção e alguns estudos realizados com a incorporação de PCM bem como a sua aplicação na construção.

No Capítulo 3 podemos ler os procedimentos de ensaio, materiais e composições usadas nesta dissertação.

No Capítulo 4 podemos observar os resultados obtidos e explicação de resultados.

No Capítulo 5 foram colocadas as conclusões obtidas durante este trabalho e indicação de trabalhos futuros.

---

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DO CONHECIMENTO

---



## **2- ESTADO DO CONHECIMENTO**

### **2.1- Generalidades**

Argamassa é a junção de cimento ou qualquer outro material ligante com agregados e água. Por vezes podem ser utilizados superplastificantes, adições e adjuvantes que modificam a viscosidade da argamassa de modo a melhorar a facilidade com que a argamassa é aplicada ou as suas propriedades no estado fresco ou endurecido [6].

Os agregados podem ser finos ou grossos e vão funcionar como o esqueleto da mistura [6].

A água é um elemento importantíssimo pois é o agente de hidratação da argamassa e vai fazer com que a mistura ganhe propriedades aglutinantes, porém o excesso dela influencia negativamente a resistência, compacidade e aumenta o volume de vazios [6].

As argamassas são uteis para unir os tijolos durante a construção da parede ou podem ser utilizadas como reboco interno ou externo. Podem ainda ser utilizadas no revestimento dos edifícios [7]

Ao proceder-se à preparação e confeção das argamassas, é impossível obter-se uma mistura de compacidade perfeita, uma vez que ficará sempre retido ar, razão pela qual se pode afirmar que este elemento é também um dos constituintes das argamassas [7].

### **2.2- Enquadramento histórico**

A aplicação de argamassas remonta às civilizações humanas mais antigas, no entanto a sua constituição é bem mais primitiva do que as utilizadas nos dias de hoje. Se antigamente se usava barro misturado com água para a construção das casas, mais tarde, com a descoberta do fogo terá possibilitado descobrir os efeitos do calor nas propriedades das argilas e dos calcários, comprovando as suas características aglutinantes, em contacto com a água [7].

Atualmente, são produzidos diversos tipos de argamassa, que se apresentam sob diferentes formas, oferecendo propriedades químicas e mecânicas especialmente adaptadas à grande variedade de construções e obras de engenharia civil [8].

Consideram-se argamassas tradicionais aquelas em que os ligantes são o gesso, a cal aérea, a cal hidráulica e o cimento, simples ou associados ou que, adicionalmente, contenham pozolanas. A consideração do cimento como ligante tradicional resulta de serem suficientemente conhecidas as suas propriedades e o seu comportamento e de já ser utilizado na construção há mais de 100 anos [8].

### **2.3- Composição e aplicação das argamassas**

A composição das argamassas é a seguinte:

- Agregados – material granular que não intervém na reacção de endurecimento da argamassa;
- Adições – material inorgânico finamente moído, que pode ser adicionado à argamassa com o objetivo de obter ou melhorar propriedades específicas;
- Adjuvante – material orgânico ou inorgânico adicionado em pequenas quantidades com o objetivo de modificar propriedades da argamassa fresca ou endurecida [9].
- Os ligantes são produtos utilizados para ligar ou aglomerar outros como as areias. Estes materiais, com o tempo, modificam a estrutura química e contribuem para o endurecimento da pasta [10].

Os agregados têm uma forte influência no comportamento das argamassas. Há vários fatores, como sejam, a dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade que afetam o comportamento da argamassa. Mas, naturalmente, também a sua origem, o estado de limpeza da areia são fatores que podem alterar as características da argamassa. Alguns destes fatores são habitualmente referidos, nos cadernos de encargos, para a seleção de areias. De facto, a areia funciona como o esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, pelo que, a qualidade do agregado é fundamental no comportamento global da pasta. Muito embora mantenham, na generalidade, a sua composição química, verificou-se que, ao longo dos tempos, se podem verificar reacções químicas entre a sílica da areia e o óxido de cálcio [10].

Os adjuvantes são produtos que adicionados aos materiais lhes conferem determinadas propriedades e anulam efeitos negativos no seu comportamento. Muitos destes adjuvantes têm origem sintética e ainda não é possível conhecer o seu efeito a longo prazo, pelo que, a sua utilização deve ser moderada em argamassas [10].

A produção das argamassas deve ser realizada com o máximo cuidado de modo a obter-se uma mistura homogênea e íntima de todas as matérias primas. Durante as operações de fabrico, todas as partículas de areia devem ser completamente envolvidas pela pasta [9].

## **2.4 - Desenvolvimento sustentável**

O planeta Terra nem sempre foi como o conhecemos atualmente. Como espécie inteligente, o Ser Humano, sempre tentou melhorar o seu estilo de vida de forma a torná-lo mais funcional. Esse desenvolvimento veio de mãos dadas com a poluição. Palavras como “aquecimento global”, “buraco do ozono” e “efeito de estufa” são cada vez mais ouvidas nas televisões de todo o mundo [11].

Na segunda metade do século XX surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável. Quando o ser humano começou a ter consciência do estado de degradação do meio ambiente, em função das suas políticas de atuação. O contínuo crescimento da população mundial, o aumento do consumo de matérias-primas, os impactos produzidos pela poluição e a crescente degradação do meio ambiente, são fatores responsáveis pela condução a um desenvolvimento social, ambiental e económico com baixo valor de sustentabilidade [12].

O desenvolvimento sustentável encontra-se assim intimamente ligado a três dimensões: económica, social e ambiental. Devendo existir um equilíbrio entre as três dimensões, procurando desta forma, uma harmonia entre as mesmas. Atualmente, a dimensão económica apresenta uma maior robustez, seguida da dimensão social e em detrimento da dimensão ambiental. Desta forma, torna-se urgente uma mudança no comportamento humano, visando uma maior preocupação com as dimensões desfavorecidas [12].

Para Portugal, o ano de 2017 foi um dos piores anos de que há memória. A seca extrema, os incêndios que deflagraram em todo o território e as tempestades levaram a que este ano fosse marcado por várias tragédias sem precedentes. Nada destas tragédias são de espantar quando vemos notícias que nos informam que “A Grande Mancha de Lixo do Pacífico”, que se trata de uma ilha feita de lixo plástico tem cerca de 1,6 milhões de quilómetros quadrados e que a temperatura média do planeta tem aumentado ao longo dos últimos 50 anos fazendo com que 50% das espécies animais se encontrem em risco [13-14].

Existem, no entanto, boas notícias. O Homem começa a tomar consciência do seu papel cancerígeno no Planeta Terra e quer encontrar soluções e estratégias mais ecológicas. Exemplo disso é a notícia de que a Noruega quer investir em aviões elétricos para diminuir



estas mudanças climáticas o que fará com que este país seja inteiramente movido a energia elétrica até 2040 [14].

Consequência de toda esta preocupação climática o buraco da camada do ozono diminui para o valor mais baixo dos últimos 30 anos devido à proibição de uso de compostos químicos e essas notícias são animadoras do ponto de vista sustentável por isso estamos num bom caminho [15-16].

A construção civil é um dos setores que mais utiliza recursos naturais não renováveis e é também o setor que mais resíduos sólidos urbanos (RSU) produz. De todos os recursos naturais extraídos da natureza, os agregados utilizados na construção civil são os minerais mais consumidos [17].

No ano de 2009 cerca de 40% do total da energia fóssil consumida foi no setor da Construção, nos Estados Unidos e na Europa. Acrescentando o consumo de energia utilizada no aquecimento, ventilação e sistemas de ar condicionado esse consumo de energia disparou para valores nunca antes atingidos o que fez com que ainda aumentasse mais a procura por soluções construtivas com elevado valor de sustentabilidade [18].

A produção de cimento Portland é uma indústria que produz uma grande quantidade de emissões de gases de efeito estufa - GEE - (cerca de 1 tonelada de Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) por tonelada de clínquer produzido), sendo responsável por cerca de 5% das emissões globais de dióxido de carbono antropogénico em todo o mundo [19].

Estudos comprovam que em 2050 os sistemas de energia renováveis serão de extrema importância para a construção. A energia eólica, fotovoltaica e energia solar térmica serão as soluções das construções futuras para atingir um gasto de eletricidade 100% renovável [20].

Espera-se que a energia gasta no setor de construção aumente em cerca de 50% em 2050 e consequentemente a energia gasta no arrefecimento dos espaços triplicará entre 2010 e 2050. Portanto, a envolvente do edifício deve ser otimizada para minimizar as cargas de arrefecimento e aquecimento. Em aplicações de energia altamente eficiente para arrefecimento, estima-se que o potencial de economia de energia esteja entre 10% e 40% [20].

## 2.5- Evolução em relação ao conforto

Numa sociedade com padrões de qualidade cada vez mais altos o conforto é cada vez mais importante, no entanto observa-se um aumento da vontade de reabilitar um edifício ao invés de construir algo novo. Reabilitar é importante porque só assim se consegue melhorar a qualidade dos edifícios já existentes [19].

Construir ou reabilitar um edifício de forma térmica requer que se conheça a idade e as tipologias construtivas já existentes para que se tire o melhor partido delas e melhore o seu comportamento. Vivemos num país onde, segundo o Instituto Nacional de Estatística (INE), 80% de edifícios contruídos têm um défice acentuado de qualidade térmica e por isso foi necessário implementar soluções. Com o aparecimento do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) começaram a aparecer as paredes com isolamento térmico [19].

Todos os anos, uma energia de cerca de  $5 \times 10^{24}$  J é fornecida pelo sol e atinge toda a superfície terrestre. Esta quantidade é cerca de 10000 vezes superior ao consumo real de energia por ano em todo o mundo. Assim, a necessidade de encontrar uma forma de tirar proveito deste recurso, juntamente com a procura de uma melhoria na qualidade do meio ambiente, é enorme. Isto tem conduzido os esforços da comunidade científica em combinar a utilização de energia solar e materiais de construção funcionais, que permitam limitar o consumo de energia [12].

A incorporação de PCM em edifícios possui impactos benéficos na dimensão social, económica e ambiental, demonstrando um contributo significativo para uma construção com maior valor de sustentabilidade [12].

Os benefícios sociais encontram-se diretamente relacionados com o aumento do conforto térmico no interior dos edifícios, sendo este um requisito relevante para a obtenção de um edifício de qualidade. O aumento do conforto térmico é conseguido através da capacidade de armazenamento térmico do PCM, permitindo armazenar e libertar energia, mantendo a temperatura no interior dos edifícios sensivelmente constantes, ou pelo menos, com variações menos significativas [12].

O aspeto ambiental está relacionado com a redução do recurso a fontes de energia não renováveis e a dimensão económica diz respeito à adequação da tecnologia e custos

associados à sua implementação e os benefícios económicos da diminuição dos consumos energéticos [12].

Em termos económicos, a incorporação de materiais de mudança de fase em argamassas de revestimento interior para edifícios, proporciona menores variações de temperatura, o que se traduz numa poupança energética [12].

## **2.6- Argamassas térmicas**

Recentemente, percebeu-se que o consumo de energia para arrefecimento no setor de construção está a aumentar rapidamente, especialmente nos países em desenvolvimento, devido à alta necessidade de conforto dos ocupantes do edifício. O aumento do calor interno, dos ganhos de edifícios, o impacto do calor urbano nas cidades superlotadas e o custo reduzido dos equipamentos de arrefecimento fazem com que seja cada vez maior a procura de equipamentos de arrefecimento [20].

Em 2010, de acordo com as previsões da Laboratório de Metrologia e Aviónicos (LMA), a procura de refrigeração espacial na União Europeia (UE) atingiu os 220 TWh e espera-se que aumente para 305 TWh (+ 38%) em 2020 e 379 TWh (+ 72%) em 2030 [21].

Outro estudo conduzido pela Plataforma Tecnológica Europeia sobre Aquecimento e Arrefecimento Renovável (RHC) mostrou que a o aumento da poluição na UE deve aumentar nos setores residencial e de serviços, como mostra a Figura 1 [22].

Além disso, em 2006, o setor de construção nos Estados Unidos da América (EUA) responde por 38,9% do consumo total de energia primária; 18% para edifícios comerciais e 20,9% para edifícios residenciais [23].

É conhecido que a energia é o motor de todas as atividades e a sua produção é cada vez maior. Consequentemente, a poluição também é cada vez maior uma vez que essa energia provém, demasiadas vezes, de combustíveis fósseis. No entanto, com o avanço dos anos, observamos um aumento da consciencialização sobre como podemos diminuir a poluição provocada por estes combustíveis fósseis [26].

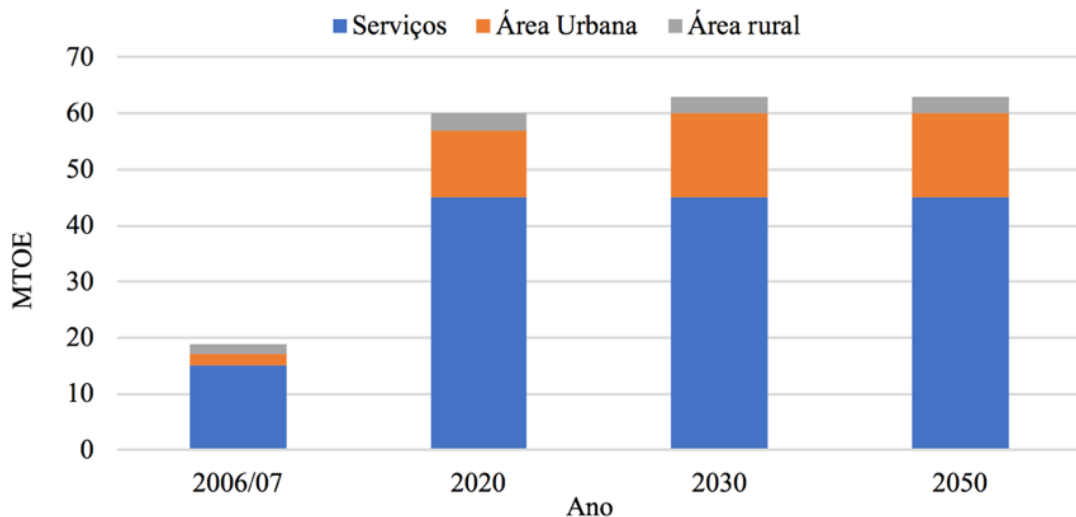


Figura 1 – Evolução da poluição na UE para o setor da construção (adaptado de [22]).

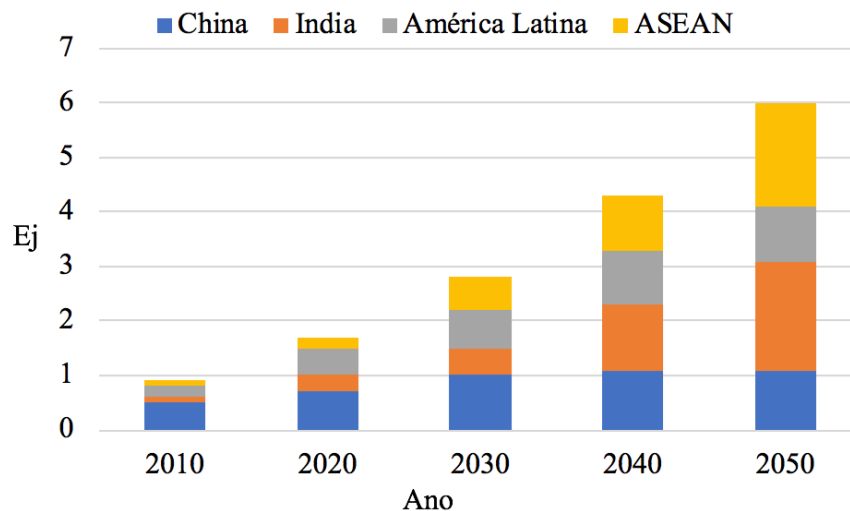


Figura 2 – Evolução do aumento do calor em várias regiões do mundo (adaptado de [25]).

A energia solar aparece como a melhor solução para minimizar esta problemática pois para além de ser uma fonte de energia limpa encontra-se disponível em todo o planeta Terra [27]. O consumo de energia nos edifícios aumentou 85% o que levou ao acréscimo de emissões de  $CO_2$  em mais de 75% entre 1980 e 2012 nas três grandes economias mundiais – EUA, EU e China. Foi exatamente na China que se registou um aumento de 40% do consumo de energia durante 1990-2009 acompanhando o seu crescimento económico [28].

Em termos de consumo de energia específica é preciso analisar os consumos de aquecimento e arrefecimento do ambiente tal como o aquecimento da água e cada país tem consumos específicos diferentes. Na União Europeia o consumo de energia para aquecimento é 60%,

já na China o aquecimento do ambiente e da água é de 71% e 68% respectivamente. Claro que os consumos do setor comercial são maiores do que o residencial, mas é este último que está em constante crescimento [29].

O Material de Mudança de Fase, apesar de ter um comportamento bastante complexo em relação a um material de construção convencional, é capaz de se adaptar ao clima o que faz com que esta seja uma grande vantagem da sua utilização. Outra grande vantagem deste material é que como o PCM absorve o calor que existe na sua envolvente e o liberta seguidamente comporta-se como um isolador térmico do edifício, mas está em constante mudança em comparação com o isolamento térmico convencional [30].

### ***2.6.1- Vantagens e desvantagens das argamassas térmicas***

As soluções existentes no mercado para minimizar o impacto da envolvente opaca do edifício no consumo energético do mesmo e incrementar o seu conforto térmico, apresentam algumas limitações, nomeadamente no que se refere à resistência mecânica, reacção ao fogo, técnicas de aplicação, preço, e, por outro lado, representam muitas vezes uma barreira à diferenciação arquitetónica na concepção. A aplicação dessas soluções apresenta frequentemente anomalias provenientes da mão-de- obra, nem sempre especializada, que reduzem drasticamente a eficiência dos sistemas, inicialmente determinada [31].

A maior vantagem das argamassas térmicas são o seu ponto de condutividade térmica que é muito baixo e que permite que a eficiência térmica seja elevada. Mas existem imensas vantagens destas argamassas tais como o isolamento com elevada resistência ao choque, elevado desempenho face ao comportamento ao fogo, pode ser moldada no interior ou exterior, boa permeabilidade ao vapor de água, é aplicável em obras novas ou em reabilitação e são 50% a 60% mais leves [32].

### ***2.6.2 - Desempenho mecânico de argamassas térmicas***

Segundo a norma ISO 6241 (1984), o desempenho de um produto encontra-se relacionado com o uso. A resistência mecânica é a propriedade dos revestimentos suportarem as ações mecânicas de diferentes naturezas [33].

As argamassas devem satisfazer certas regras de qualidade, tais como, aspetos relacionados com a trabalhabilidade, aderência ao suporte, resistência aos choques, compatibilidade com o suporte e resistência à fendilhação [34].

### ***2.6.3- Produção da Argamassa***

A argamassa deve ser produzida com o máximo cuidado de modo a obter uma mistura homogênea de todas as matérias-primas e realizam-se de acordo com a norma EN 1015-2 [35].

Tradicionalmente, a mistura é realizada em obra, de forma manual ou em betoneira, embora hoje em dia praticamente só se utilize o fabrico mecânico. Independentemente do processo de produção, os equipamentos utilizados devem estar limpos, de modo a evitar contaminações da argamassa [35].

Em laboratório, é realizada a amassadura mecânica das argamassas com a misturadora. A amassadura mecânica garante uma melhor homogeneidade da massa em cada amassadura e ao longo do tempo e reduz a possibilidade de haver perdas de matéria-prima. O local de instalação da misturadora deve-se encontrar protegido [35].

## **2.7- Material de mudança de fase**

### ***2.7.1- Generalidades***

Como o consumo de energia dos sistemas de aquecimento e ar condicionado ainda está a aumentar com o crescente aumento do conforto térmico, existe um grande potencial para melhorar a eficiência energética do edifício nas áreas de tecnologias de aquecimento e arrefecimento [36].

Uma das melhores maneiras de reduzir os consumos de energia através do uso de armazenamento de energia térmica (MTE). Dependendo das circunstâncias ambientais, os materiais MTE podem absorver calor, armazená-lo e liberá-lo; melhorar a diferença entre o aprovisionamento energético e o consumo de energia [36].

A energia pode ser armazenada por materiais TES de três maneiras: calor sensível, calor latente ou reações químicas. O armazenamento de energia térmica por calor latente

(AGTCL) é uma maneira cativante e tem recebido muita atenção nas últimas décadas para fins de aquecimento e arrefecimento em edifícios multifamiliares. Em edifícios residenciais, uma grande variedade de estudos provou que a aplicação de massa térmica em estruturas bem isoladas fornece economia de energia de arrefecimento e aquecimento entre 5 e 30% [37].

Recentemente, os materiais de mudança de fase (PCM), que utilizam o princípio da AETCL, receberam grande interesse e formam uma tecnologia promissora. O PCM possui uma grande capacidade de armazenamento de energia térmica numa faixa de temperatura próxima ao seu ponto de fusão e apresenta um comportamento quase isotérmico durante o processo de carga e descarga [38].

O uso correto do PCM pode minimizar o pico de aquecimento e arrefecimento e tem a capacidade de manter a temperatura interna dentro da faixa de conforto devido a menores oscilações de temperatura. Consequentemente, reduz as dimensões e o consumo de energia do equipamento técnico correspondente [39].

Depois de 2010 as investigações sobre o PCM têm vindo a crescer bastante devido à variedade de aplicações, propriedades térmicas e estruturais deste material. Muitos estudos investigaram o uso de PCM em edifícios e mostraram que o PCM pode melhorar consideravelmente o desempenho energético do edifício. Mas muitas dificuldades foram encontradas, especialmente no que diz respeito ao uso eficiente do PCM e sua aplicação prática [39].

### ***2.7.2- Princípio de funcionamento de PCM***

Os materiais de mudança de fase são materiais capazes de armazenar uma grande quantidade de energia calorífica devida ao seu elevado calor de fusão e conseguem libertar esta energia a uma temperatura constante durante a sua mudança de fase [40].

Os materiais de mudança de fase, denominados na língua inglesa de “*Phase Change Materials*” (PCM), possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. Quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta, o material atinge o seu ponto de fusão e transita de estado, neste caso do estado sólido para estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica ambiente. Por outro lado, quando a

temperatura ambiente diminui e atinge o ponto de solidificação do PCM, este muda novamente de estado, sendo neste caso do estado líquido novamente para o estado sólido, libertando a energia anteriormente armazenada [12].

De todos os materiais existentes aquele cuja assimilação do conceito de mudança de fase, torna a sua percepção mais fácil, é a água. A água pode apresentar-se no estado sólido, líquido ou gasoso. O processo de transição do estado sólido para o estado líquido é denominado de fusão e o processo inverso de solidificação, ocorrendo ambos a cerca de 0°C. Por sua vez, a transição do estado líquido para o gasoso denomina-se de vaporização e o processo inverso de condensação, ocorrendo a cerca de 100°C. A cada mudança de estado encontra-se associada uma quantidade de energia, denominada de entalpia [12].

A alta capacidade de armazenamento de energia por unidade de volume a uma temperatura quase constante caracteriza e distingue este material dos convencionais [41]. A solidificação do PCM ocorre à noite quando a temperatura ambiente é menor que a temperatura interna. Quando estamos perante um processo ativo o ar fresco externo flui através da unidade de armazenamento, por meio de um ventilador, absorvendo calor do PCM, o que leva ao início do processo de solidificação, que dura até que a temperatura externa se torne quase igual à temperatura de solidificação do PCM [42].

Quando o processo é passivo a fusão do PCM ocorre durante o dia, quando a temperatura interna aumenta acima da faixa de conforto. O ar quente da sala passa através da unidade de armazenamento e o calor é absorvido pelo sólido PCM, que leva ao início do processo de fusão. Consequentemente, a temperatura do ar ambiente é reduzida e o ar resfriado é liberado para o interior do edifício [42].

A mudança de fase por evaporação possui uma elevada entalpia, contudo apresenta alguns problemas de aplicação, como uma elevada variação de volume e de pressão durante a transição de fase. Os materiais de mudança de fase com transição sólido-líquido são os preferidos para o armazenamento de energia térmica, uma vez que a sua alteração de volume não é significativa. Por último, a transição sólido-sólido possui características muito semelhantes aos materiais de mudança de fase com transição sólido-líquido, mas com uma capacidade de armazenamento de energia significativamente inferior [12].



### **2.7.3- Classificação do PCM**

É do conhecimento geral que todos os materiais interagem com o meio ambiente, no entanto, grande parte não possui capacidade de alterar as suas propriedades de acordo com as características do ambiente em que são aplicados [12].

Os materiais de mudança de fase são classificados em materiais orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas e o seu uso é diferente e existe um número considerável de PCM disponível para uma faixa de temperatura desejada [43].

Cada grupo tem uma faixa típica de temperatura de fusão e sua entalpia. As ceras de parafina, hidratos de sal, ácidos graxos e compostos orgânicos e não orgânicos eutéticos são os mais utilizados nos últimos 30 anos [43].

As não parafinas por sua vez possuem características camaleónicas mudando consoante a escolha do usuário, mas são extremamente inflamáveis pelo que não podem ser usadas em temperaturas mais altas [44].

Ser um PCM do tipo eutético significa que foi necessária a combinação de dois ou mais materiais de mudança de fase para que se conseguisse o produto com as características pretendidas. Estes materiais são usados quando os outros tipos de PCM não conseguem suportar pontos de fusão muito elevados ou muito baixos [44].

Uma característica interessante do Material de Mudança de Fase é que, apesar de todos terem características diferentes e específicas podem ser combinados para se obter novas características e melhoradas existindo novas soluções. Por exemplo, o uso de sais metálicos pode aumentar a condutividade térmica do PCM [45].

Para uma aplicação específica, o PCM para armazenamento de energia térmica em edifícios não atende a todos os requisitos declarados acima e às propriedades de desempenho. Cada material tem suas próprias características específicas, que podem ser melhoradas propondo diferentes soluções. Por exemplo, o uso de PCM inorgânicos de sais metálicos pode aumentar a condutividade térmica do PCM ou a introdução de um agente de nucleação pode suprimir o super-arrefecimento e o uso de espessura de PCM [45].

Um resumo simplificado da classificação de PCM é apresentado na Figura 3.

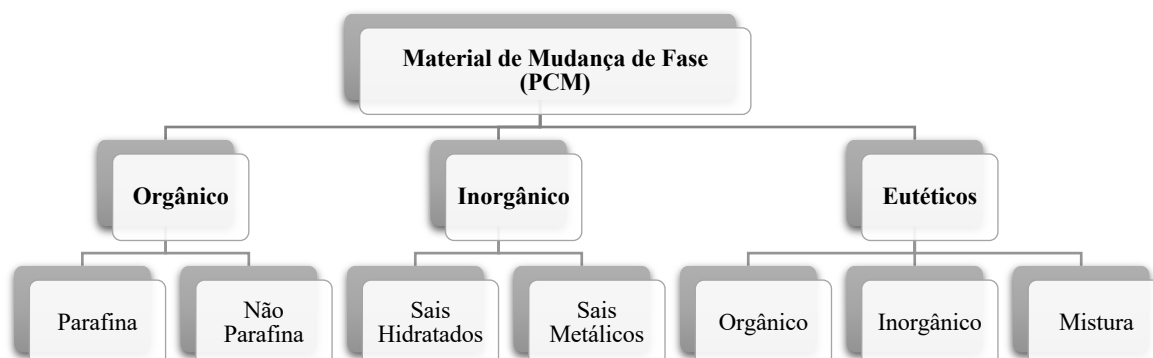


Figura 3 - Classificação do Material de Mudança de Fase (adaptado de [45]).

#### ***2.7.4- Comparação entre os diferentes tipos de PCM***

Tendo em conta a existência de vários tipos de materiais de mudança de fase são várias as vantagens e desvantagens associadas à utilização destes materiais.

A Tabela 1 sintetiza as vantagens e desvantagens da utilização de PCM de natureza orgânica. A Tabela 2 sintetiza as vantagens e desvantagens da utilização de PCM de natureza inorgânica e a Tabela 3 sintetiza as vantagens e desvantagens da utilização de misturas eutéticas [12].

#### ***2.7.5- Vantagens e desvantagens da sua utilização***

Como já foi referido os sistemas de armazenamento de energia térmica usando materiais de mudança de fase (PCM) podem ser uma maneira muito útil de melhorar o desempenho térmico do edifício. O uso correto do PCM pode minimizar os picos de aquecimento e arrefecimento, diminuir o uso de sistemas mecânicos e tem a capacidade de manter a temperatura interna dentro do intervalo de conforto devido a menores flutuações de temperatura [46]. Mas a principal vantagem do uso do PCM é que ele aumenta o potencial de armazenamento térmico com uma alteração mínima do projeto de construção existente [47].

Tabela 1 - Vantagens de Desvantagens do PCM de natureza Orgânica (adaptado de [12]).

**PCM ORGÂNICO**

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Disponibilidade de uma ampla gama de temperaturas	Baixa condutibilidade térmica
Elevado calor latente de fusão	Menor densidade
Baixa capacidade de sub-arrefecimento da fase líquida	Menor capacidade volumétrica de armazenamento (menor entalpia)
Mudança de fase congruente	Inflamável (possível de utilizar aditivos anti-fogo)
Propriedades de Auto nucleação	Incompatível com recipientes plásticos
Baixa segregação	Variação de volume considerável
Boa taxa de nucleação	Custo considerável (as parafinas comerciais são baratas e acessíveis, as parafinas puras podem ser dispendiosas)
Estabilidade térmica e química	—
Não reativa e não corrosivo	—
Compatível com materiais de construção	—
Reciclável	—

Muitas desvantagens foram encontradas em aplicações de PCM, principalmente o intenso impacto das condições climáticas do verão sobre o desempenho do PCM, que proíbe a sua completa solidificação durante a noite e, assim, limitando a sua eficácia durante o dia [46].

Nem todos os PCM existentes podem ser utilizados para o armazenamento térmico. Um PCM ideal deve possuir algumas propriedades termofísicas, cinéticas, químicas, ambientais e económicas desejáveis [12].

Tabela 2 - Vantagens de Desvantagens do PCM de natureza Inorgânica adaptado de [12].

**PCM INORGÂNICO**

<i><b>Vantagens</b></i>	<i><b>Desvantagens</b></i>
Maior capacidade volumétrica de armazenamento (maior entalpia)	Problemas e sub-arrefecimento da fase líquida
Elevado calor latente de fusão	Baixas propriedades de nucleação
Baixo custo	Mudança de fase incongruente
Facilmente disponível	Baixa estabilidade térmica
Elevada condutibilidade térmica	Problemas de separação do material durante a transição de fase
Não inflamável	Aplicação com possível necessidade de agentes de nucleação
Baixa variação de volume	Decomposição
Compatível com recipientes plásticos	Incompatível com alguns materiais de construção
Baixo impacto ambiental	Corrosivo para a maioria dos metais
—	Levemente tóxico

Tabela 3 - Vantagens de Desvantagens do PCM de Misturas Eutéticas adaptado de [12].

**MISTURAS EUTÉTICAS**

<i><b>Vantagens</b></i>	<i><b>Desvantagens</b></i>
Temperatura de fusão adequada às necessidades	Propriedades termofísicas limitadas
Capacidade volumétrica de armazenamento (entalpia) superior aos PCM orgânicos	Odor forte
Mudança de fase congruente	—

Relativamente às propriedades termofísicas é necessário que o PCM selecionado possua [12]:

- Temperatura de transição na gama de temperaturas de operação desejadas, com o intuito de garantir o armazenamento e a libertação de calor;

- Elevado calor de transição por unidade de volume, de modo a armazenar o máximo de energia possível incorporando a quantidade mínima de PCM;
- Elevado calor sensível, traduzido pela sua capacidade calorífica, de modo a aumentar a sua capacidade de armazenamento de energia;
- Elevada condutibilidade térmica tanto no estado sólido como no estado líquido, de forma a facilmente promover a transferência de calor;
- Reduzida variação de volume durante a transição de fase, de forma a reduzir os problemas relacionados com a sua contenção;
- Elevada densidade;
- Fusão congruente;
- Estabilidade térmica a longo prazo;
- Ausência de segregação durante a mudança de fase.

No que concerne às suas propriedades ambientais os materiais de mudança de fase apresentam baixo consumo de energia incorporada, facilidade de separação de outros materiais, elevado potencial de reciclagem e baixo impacto ambiental [12].

Por fim, sob o ponto de vista económico existem no mercado PCMs com baixo custo de aquisição e em quantidade abundante [12].

### ***2.7.6- Métodos de Incorporação de PCM***

O PCM pode ser incorporado em materiais de construção através de diferentes métodos, sendo estes a incorporação direta, imersão, encapsulamento e estabilização [48].

#### ***2.7.6.1- Incorporação Direta***

A incorporação direta é o método mais simples e económico para a utilização do PCM, sendo que o material é diretamente misturado com os materiais de construção durante a sua produção [12].

Neste método o PCM no estado líquido é adicionado diretamente aos materiais de construção. Neste método o problema é a compatibilidade dos materiais com o PCM [48].

A desvantagem deste método recai sobre o facto dos materiais perderem alguma resistência na ligação entre a pasta e o agregado, diminuição da durabilidade e características mecânicas.

Por outro lado, o material apresenta ainda a possibilidade de deslocar do local em que foi aplicado [12].

#### 2.7.6.2- Encapsulamento

Nesta técnica o PCM é encapsulado antes da sua incorporação em produtos de construção, garantindo-se que este não se desloca do local em que foi aplicado durante a fase líquida. A contenção do PCM deve atender a requisitos de resistência mecânica, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica, assim como agir como uma barreira de proteção. Deve também possuir superfície suficiente para a transferência de calor, assegurar a estabilidade estrutural e o fácil manuseio do material [12].

Existem dois tipos de formas de encapsulamento: microencapsulamento e macroencapsulamento. Microencapsulação é uma tecnologia na qual as partículas de PCM são fechadas num polímero de alta resistência evitando o vazamento durante o processo de mudança de fase [49].

O microencapsulamento consiste na colocação de uma pequena massa molecular em pequenas partículas, revestidas por polímeros de elevado desempenho. As microcápsulas podem ser esféricas ou assimétricas e com forma variável, com diâmetro inferior a 1 cm. Contudo, o diâmetro preferencial situa-se entre 1 e 60  $\mu\text{m}$ . A vantagem deste processo de encapsulamento consiste na melhoria da transferência de calor, através da sua grande superfície específica [12].

O macroencapsulamento baseia-se na introdução de PCM em tubos, painéis ou outro recipiente de grandes dimensões, geralmente recipientes com mais de 1 cm de diâmetro. Nesta técnica é possível colocar uma quantidade significativa de PCM num único recipiente. As principais vantagens deste método são a facilidade de transporte e manuseamento, a possibilidade de o encapsulamento ser específico para uma determinada finalidade, melhor compatibilidade com o material e redução das alterações de volume externas. Como desvantagens podem enunciar-se a baixa condutividade térmica, necessidade de proteção dos elementos de contenção contra a destruição e possibilidade de solidificação do PCM nos cantos e arestas, diminuindo assim a transferência de calor [12].

Os métodos de microencapsulamento são divididos em processos químicos, físico-químicos ou mecânicos e o material de formação da cápsula depende destes processos pois ditará a estabilidade do material [12].

#### 2.7.6.3- Estabilização

Esta técnica é realizada usando polietileno de alta densidade, estireno e butadieno. O PCM e o material de apoio são fundidos e misturados a uma temperatura elevada seguida por um arrefecimento do material de suporte, até que a mistura se torne sólida. Como vantagens deste método temos o seu elevado calor específico, adequada condutibilidade térmica e manutenção da estabilização do PCM durante o processo de transição de fase, sem necessidade de recipiente de contenção [50].

#### 2.7.6.4- Imersão

No método de imersão, os produtos de construção são mergulhados em PCM líquido, que o vão absorver por capilaridade. A desvantagem, tal como na incorporação direta, o PCM pode interferir com os produtos de hidratação dos materiais de construção e afetar as propriedades mecânicas e de durabilidade [51].

#### **2.7.7- Problemas na aplicação do PCM**

Mesmo efetuando uma seleção rigorosa do material de mudança de fase a aplicar, nem sempre este consegue cumprir todos os requisitos. Como problemas mais frequentes na aplicação dos materiais de mudança de fase podemos referir a separação de fases, o super-arrefecimento e a resistência ao fogo [12].

A separação de fases constitui um problema que pode levar ao mau funcionamento dos materiais de mudança de fase. Numa situação ideal uma substância sólida quando transita para a fase líquida mantém a sua composição homogénea, consequentemente quando volta a transitar de fase continua a manter a mesma composição e homogeneidade do material, apresentando desta forma sempre a mesma entalpia e temperatura de transição, durante o seu ciclo de vida [12].

O super-arrefecimento consiste na solidificação do material a uma temperatura inferior à temperatura de transição de fase. Basicamente durante o aquecimento o material de mudança de fase possui um bom comportamento, contudo no arrefecimento não consegue libertar a energia armazenada, sendo assim necessário que a temperatura exterior baixe significativamente para que o material complete o seu ciclo de funcionamento [12].

Nos últimos anos, tem vindo a verificar-se uma crescente preocupação com a resistência ao fogo, de forma a proteger os edificios contra os riscos de incendio. Os materiais de mudança de fase orgânicos, mais concretamente as ceras de parafina, apresentam alguns riscos de inflamabilidade o que levanta algumas preocupações com a resistência ao fogo dos produtos onde este material for aplicado. Uma solução que tem vindo a ser estudada consiste na introdução de um material estabilizador com propriedades de retardador de chama, como por exemplo o hidróxido de magnésio e a sílica [12].

### ***2.7.8- PCM na envolvente da construção***

De todas as aplicações de PCM em edificios, a mais interessante é a sua incorporação em materiais de construção com o objetivo de alterar as suas propriedades térmicas [52]. A utilização de PCM em edificios pode suavizar a flutuação da temperatura no interior dos edificios, diminuindo assim o recurso a equipamentos de climatização. Existem uma série de possibilidades: o PCM pode ser usado como um meio de armazenamento térmico para aquecimento solar passivo, pode ser incorporado no pavimento, na parede ou no teto e pode também fazer parte do mais complexo sistema térmico, tais como bombas de calor e painéis solares. Sendo que, a grande vantagem da incorporação de PCM nos edificios é a vasta área que estes oferecem para armazenamento e transferência de calor com o objetivo de suavizar a flutuação da temperatura no edificio reduzindo o recurso a equipamentos de climatização [12].

Como o PCM tem capacidade para reduzir as cargas térmicas do edificio o que vai acontecer é que a sua incorporação trará muitas vantagens durante as horas de pico térmico do edificio. [52].

K. Du et al. [53] utilizaram os materiais de mudança de fase (PCM's) e suas aplicações para aquecimento, arrefecimento e geração de eletricidade de acordo com sua faixa de temperatura de trabalho de (-20°C a +200°C), sendo aplicados em arrefecimento,



aquecimento de edifícios e absorção de calor residual e geração de eletricidade. Dividiu-os em 4 gamas: ( $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+5^{\circ}\text{C}$ ), ( $+5^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ ), ( $+40^{\circ}\text{C}$  a  $+80^{\circ}\text{C}$ ) e ( $+80^{\circ}\text{C}$  a  $+200^{\circ}\text{C}$ ) com especificidades técnicas diferentes para cada um. Testaram melhorias de desempenho, impactos ambientais e custos, e as classificações de PCMs e aplicações em diferentes faixas de temperatura, estudos prévios armazenamento térmico latente com PCM's integrados em diferentes aplicações.

Eddhahak et al. [54] estudaram o PCM em argamassas mais especificamente a libertação de calor durante a hidratação e descobriram que as argamassas incorporando PCM libertam menos calor quando comparadas às argamassas convencionais e que a reação de hidratação é claramente afetada pela inclusão de PCM.

#### 2.7.8.1- PCM aplicado nas paredes

Em 2009, na Alemanha, um trabalho usando PCM microencapsulado integrado em painéis colocados em paredes provaram que na presença de PCM existe uma diminuição do sobreaquecimento e o excesso de calor é armazenado nas paredes durante o dia que depois é libertado durante a noite quando a temperatura do ar baixa [55].

Lai et al. [55] avaliaram o contributo de várias percentagens de PCM incorporado em placas de gesso. Usaram várias percentagens de PCM em 23%, 30% e 40% e concluíram que a capacidade de armazenamento térmico aumenta com a presença de uma maior percentagem de PCM. Esta solução é bastante interessante devido a resultados de vários estudos realizados, foi possível perceber que o PCM incorporado em placas de gesso não só vem aumentar a eficiência energética do edifício como é uma solução de baixo custo e de variada aplicação.

Athenitis et al. [56] realizaram um estudo utilizando materiais de mudança de fase incorporados em placas de gesso, aplicadas nas paredes. Verificaram uma diminuição da temperatura ambiente máxima em cerca de  $4^{\circ}\text{C}$ .

Shilei et al. [57] avaliaram a utilização de PCM incorporado em placas de gesso, com 9.5mm de espessura e 26% de PCM, com temperatura de transição de  $17.9^{\circ}\text{C}$  a  $20.3^{\circ}\text{C}$  e permitiu confirmar uma menor oscilação de temperatura aquando a utilização de PCM.

Darkwa et al. [58] examinaram o comportamento de duas soluções com incorporação de PCM. Numa primeira fase utilizaram placas de gesso cartonado, com 12 mm de espessura, embebidas com PCM de modo a comparar diretamente com uma outra situação, em que aplicaram placas de gesso cartonado simples, com 10 mm de espessura, revestidas com lâminas de PCM com 2 mm. A quantidade de PCM incorporada em ambos os casos foi de 17% e os resultados indicaram que a utilização de PCM laminado, é mais eficiente uma vez que contribuiu para um aumento de 17% na temperatura interior mínima.

Sakulich et al. [59] descobriram que incorporando PCM numa argamassa a expansão da parede e o congelamento dela diminuem devido à capacidade de armazenamento e libertação de energia da argamassa e que por isso o tempo de vida útil da parede aumentava.

#### 2.7.8.2- PCM em Pavimentos

A incorporação de PCM em pavimentos é também uma proposta muito interessante.

Nagano et al. [60] criaram um sistema com incorporação de PCM no pavimento que compreendia uma camada permeável de PCM com 3 cm de espessura, com temperatura de transição de 20°C, aplicada por baixo do pavimento e assente sobre uma laje em betão com caixa-de-ar. Os resultados exibiram que a mudança de fase do PCM ocorria entre os 17 e 22°C, com uma entalpia de 31 kJ/kg. Desta forma, foi possível a manutenção da temperatura interior entre 1.5-2.1 vezes mais tempo, comparativamente a uma solução sem PCM, bem como um armazenamento diário de energia de 1.79 MJ/m<sup>2</sup>.

Lin et al. [61] desenvolveram um sistema de pavimento radiante, elétrico, incorporando placas de polietileno impregnadas com PCM, com temperatura de fusão de 52°C. Os testes foram realizados numa célula de teste equipada com um sistema de aquecimento elétrico, ativo entre as 23:00 e as 08:00, do dia. Durante o período monitorizado foi registada uma temperatura exterior de 13.6°C e temperatura interior de 20°C, tendo-se verificado que cerca de 3.3kW/h da energia elétrica consumida foi transferida para horas de vazio, correspondendo a um total de cerca de 54% do consumo.

#### 2.7.8.3- PCM em Janelas

As janelas são consideradas a principal fonte de entrada de calor num edifício, mas como sabemos a sua existência durante o período de Verão pode ser um problema e por isso são colocadas cortinas ou persianas para evitar o sobreaquecimento do local. A integração do PCM nas persianas internas pode reduzir ou mesmo atrasar o aumento da temperatura das persianas, e então a liberação de calor para o edifício é atrasada. A empresa ZAE Bayern e Warema (projeto “Innovative PCM-technology”) foi quem testou esta teoria em condições reais e em comparação com as persianas convencionais a temperatura do ar ambiente era 2°C menor com o uso das persianas com incorporação de PCM e a temperatura dessas persianas diminuiu cerca de 10°C. Concluíram, por fim, que o conforto térmico da sala melhorou bastante [62].

Sharma et al. [63] desenvolveram um sistema de persianas com incorporação de materiais de mudança de fase, com aplicação no exterior dos envidraçados. Durante o dia este sistema permanece aberto do lado exterior sendo exposto à radiação solar, o que permite a absorção do calor. À noite, o sistema é fechado irradiando calor para o interior das divisões. Esta solução permite aumentar a temperatura interna em cerca de 2°C.

#### 2.7.8.4- PCM em tetos

Griffiths [64] utilizou um PCM microencapsulado em suspensão aquosa com temperatura de transição de 18°C aplicado numa solução de refrigeração de tetos e utilizando bombas disponíveis no mercado permitiu observar uma concentração de 40% de PCM que pode ser utilizado como solução construtiva de tetos.

Zhou [65] observou o comportamento de um compartimento revestido por painéis com incorporação de PCM, no teto e paredes, com temperatura de transição de 21°C. Os resultados permitiram observar que durante a estação de aquecimento se consegue poupar cerca de 47% da energia durante o período diurno, correspondendo a uma poupança total de cerca de 12%.

---

# CAPÍTULO 3

MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E PROCEDIMENTOS DE  
ENSAIO

---



### 3- MATERIAIS, COMPOSIÇÕES E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Este capítulo tem como objetivo principal descrever os materiais utilizados e procedimentos de ensaios utilizados na realização de todo o trabalho.

Foram testadas argamassas contendo 0%, 5%, 10% e 20% de PCM de modo a testar o seu comportamento e analisar o seu comportamento a temperaturas extremas.

#### 3.1- Materiais

##### 3.1.1- Cimento Portland

Foi utilizado cimento Portland Tipo II classe 32,5N de cor cinza produzido pela Secil. Foi escolhido por ser o mais comum na produção de argamassas para revestimentos interiores. Este cimento é designado por CEM II/B-L Classe 32.5N (Tabela 4). Os cimentos do tipo II contribuem para uma construção mais sustentável, garantindo um elevado desempenho adequado à maioria das necessidades da construção reduzindo a pegada ecológica. É um cimento de calcário composto por 65% a 79% de clínquer, 21% a 35% de calcário e 0% a 5% de outros constituintes. As principais características deste cimento é cor cinza, com menor calor de hidratação e maior trabalhabilidade.

Tabela 4 - Valores de Resistência à compressão do cimento Portland.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
<i>Resistência aos primeiros dias</i>		<i>Resistência de Referência</i>	NP EN 196-1
2 Dias	7 Dias	28 Dias	
-	≥ 16	≥ 32.5 e ≤ 52,5	

##### 3.1.2- Água

Para este trabalho foi utilizada água do serviço público a 20°C. No Inverno utilizou-se uma chaleira para aquecer a água quando esta não estava a 20°C.

O cimento em contacto com água acima dos 20°C inicia imediatamente a sua cura e o PCM solidifica a temperaturas inferiores a 20°C por isso foi muito importante a utilização de um termómetro para controlar esse parâmetro.

### ***3.1.3- Agregados***

As areias provêm da desagregação das rochas. Do ponto de vista químico, podem distinguir-se dois grupos principais: as areias siliciosas (quartzosas e graníticas) e as areias calcárias. Foram usados dois tipos de areias de granulometrias diferentes.

É importante o conhecimento e caracterização dos agregados pois são eles que influenciam algumas propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de areias designadas por Areia A e Areia B ambas de natureza siliciosa.

A Areia A apresentou uma massa volúmica de 2600 kg/m<sup>3</sup> e a Areia B de 2569 kg/m<sup>3</sup>.

A Figura 4 representa a curva granulométrica da areia A. Podendo-se verificar que se trata de um areia constituída essencialmente por partículas com dimensões entre 0.125 mm e 0.5 mm. Foi possível determinar que D<sub>10</sub> corresponde a 0,150mm, D<sub>50</sub> corresponde a 0.310mm e D<sub>90</sub> corresponde a 0.480mm [12].

A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica da areia B, tendo sido possível observar uma distribuição de partículas entre 0.125 mm e 8 mm, sendo que D<sub>10</sub> corresponde a 0.1623mm, D<sub>50</sub> corresponde a 0.7mm e D<sub>90</sub> corresponde a 2.8mm [12].

### ***3.1.4- Cinzas volantes***

As cinzas volantes utilizadas são resultantes da combustão de carvão na central termoelétrica do Pego, com uma massa volúmica de 2420 kg/m<sup>3</sup>.

### ***3.1.5- Material de Mudança de Fase (PCM)***

O PCM utilizado é não-encapsulado, constituído por uma parafina com uma temperatura de transição entre 20-23 °C, entalpia de 200 kJ/kg, massa volúmica no estado sólido de 760

$\text{kg/m}^3$  e massa volúmica no estado líquido de  $700 \text{ kg/m}^3$  (Tabela 5). A seleção desta temperatura de transição encontra-se relacionada com a adequação da temperatura à gama de temperatura de conforto dos edifícios.

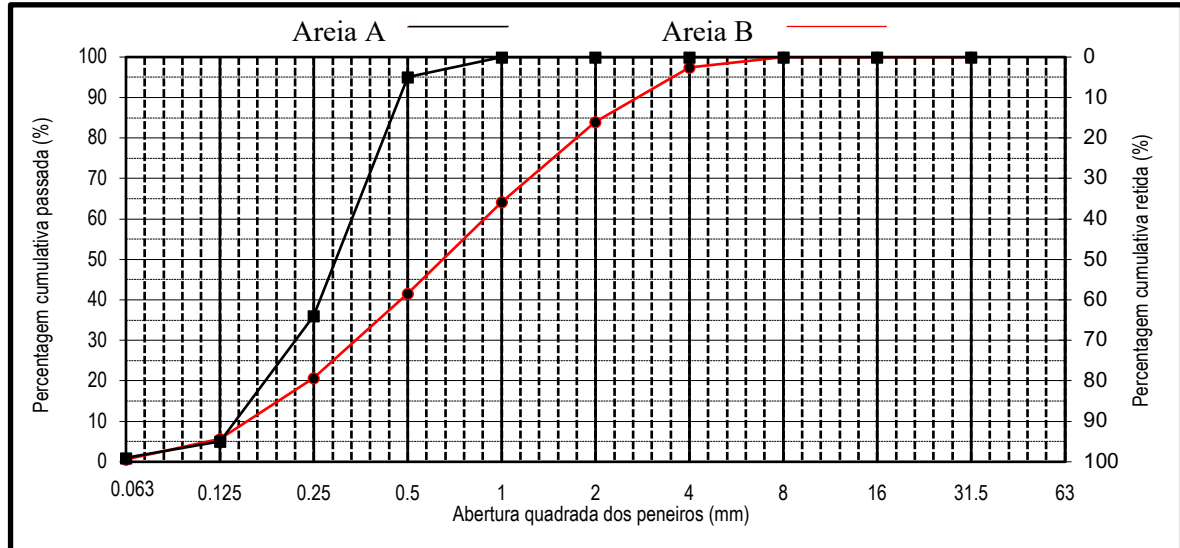


Figura 4 - Curva granulométrica da areia A e B, adaptado de [12].

Apesar do PCM utilizado ter como temperatura de fusão  $22^{\circ}\text{C}$ , é possível verificar que o processo de transição se inicia aos  $16^{\circ}\text{C}$  e termina aos  $24^{\circ}\text{C}$  (Figura 5). Esta observação leva-nos a concluir que a transição do material de mudança de fase não é um processo instantâneo que ocorre na temperatura de transição, mas sim um processo gradativo que se inicia antes a uma temperatura mais baixa que a temperatura de transição e termina para uma temperatura superior [12].

A seleção deste material teve por base a diminuição dos custos de produção das argamassas, uma vez que o seu custo de aquisição é significativamente inferior ao custo do PCM encapsulado.

### 3.2- Composições

As composições utilizadas nesta dissertação foram desenvolvidas atendendo a trabalhabilidade adequada para o manuseamento das argamassas. As composições encontradas apresentam-se na Tabela 6.



Tabela 5 - Propriedades do PCM não-encapsulado, adaptado de [12].

PROPRIEDADE	
<i>Temperatura de transição</i>	22°C
<i>Temperatura máxima de operação</i>	50°C
<i>Entalpia</i>	200kJ/kg
<i>Densidade no estado líquido</i>	700kg/m <sup>3</sup>
<i>Densidade no estado sólido</i>	760kg/m <sup>3</sup>

A percentagem de ligantes utilizada foi 40% Cimento e 60% cinzas volantes de forma a reaproveitar uma grande quantidade de resíduos. Foram usadas duas areias em percentagem iguais, 50% Areia A e 50% Areia B de forma a obter uma areia de maior compacidade.

Inicialmente foram colocadas as areias em estufa, a uma temperatura constante de 105°C, até se atingir a massa constante, ou seja, até eliminar qualquer humidade presente nas amostras em estudo.

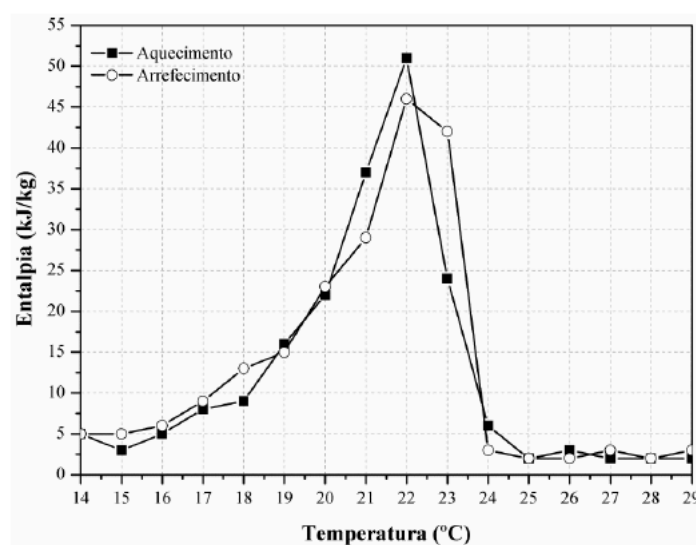


Figura 5 - Entalpia do PCM não encapsulado [12].

### 3.3- Propriedades físicas das argamassas

As propriedades físicas determinadas foram a trabalhabilidade, massa volúmica, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e resistência ao gelo-degelo.

Tabela 6 – Formulação das argamassas ( $\text{kg/m}^3$ ).

<b>Composição</b>	<b><i>Cimento</i></b>	<b><i>Cinzas Volantes</i></b>	<b><i>Areia (A)</i></b>	<b><i>Areia (B)</i></b>	<b><i>Água</i></b>	<b><i>PCM</i></b>
<b><i>0% PCM – CEM II-B-L 32.5N</i></b>	200	300	659,1	659,1	300	0
<b><i>5% PCM – CEM II-B-L 32.5N</i></b>	200	300	583,6	583,6	275	58,4
<b><i>10% PCM – CEM II-B-L 32.5N</i></b>	200	300	526,2	526,2	252,5	105,2
<b><i>20% PCM – CEM II-B-L 32.5N</i></b>	200	300	442,3	442,3	215	176,9

### 3.3.1- Trabalhabilidade

Os ensaios de trabalhabilidade das argamassas foram realizados segundo o método da mesa de espalhamento, especificado pela norma europeia EN 1015.3:1999 [66]. Esta norma determina a consistência e deformabilidade da argamassa fresca.

Este ensaio tem como base a colocação da argamassa fresca sobre um disco através de um molde definido e sujeitá-la a um determinado número de impactos verticais (Figura 6). A realização do ensaio consiste em colocar o molde troncônico no centro da mesa de espalhamento, colocando a argamassa em 2 camadas sensivelmente iguais, compactando cada camada com 10 pancadas para assegurar o preenchimento uniforme do molde. Na segunda camada deve ser retirado o excesso de material na superfície do molde. Posteriormente retira-se o molde e aplicam-se 15 pancadas a uma velocidade constante de uma pancada por segundo.

A consistência é medida pelo diâmetro médio de duas medidas de direções perpendiculares entre si após ter sido sujeita aos impactos verticais. Neste trabalho o diâmetro médio foi considerado válido quando compreendido entre  $180 \pm 5\text{mm}$ . A quantidade de água foi definida de modo a que este diâmetro fosse atingido.

Caso o diâmetro médio não seja entre os valores recomendados então será realizado um novo ensaio com uma nova argamassa. A razão água/ligante (A/L) da nova argamassa será influenciada pelo resultado do diâmetro médio obtido na argamassa testada inicialmente.



Figura 6 - Molde troncónico para realização do ensaio de trabalhabilidade.

### ***3.3.2 – Absorção de água por capilaridade***

Os ensaios de absorção de água por capilaridade permitem determinar a capacidade de penetração da água no interior das argamassas segundo a norma EN 1015-18 [67].

Para a realização deste ensaio começou-se por moldar 3 provetes prismáticos com dimensões  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Todos os provetes foram conservados durante 28 dias na câmara húmida com uma humidade relativa de 90%.

De seguida, os provetes foram colocados em estufa a uma temperatura constante de  $60^\circ\text{C}$ , ate atingirem uma variação de massa inferior a 0.2% da massa total. Depois de estabilizada a massa, os provetes foram partidos a meio por flexão e de seguida procedeu-se à impermeabilização das faces laterais de modo a limitar o contacto da água apenas na face inferior dos provetes que foram colocadas em contacto com uma lâmina de água com altura de 5 a 10 mm.

Foi garantido que os provetes se encontravam em contacto com a água na face mais representativa da sua microestrutura, colocando a face resultante do corte por flexão diretamente na água.

A água absorvida foi calculada através da realização de sucessivas pesagens dos provetes. Estas pesagens foram feitas de acordo com um plano de pesagens previamente estabelecido, com início no primeiro contato dos provetes com a água o que levou ao cumprimento dos intervalos de tempo definidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Planificação do ensaio de absorção de água por capilaridade durante as primeiras 24h.

Medição	Instante (h)	Instante (min)
1	0	0
2	0,17	10
3	0,5	30
4	1	60
5	1,5	90
6	2	120
7	3	180
8	4	240
9	5	300
10	6	360
11	24	1440

O coeficiente de absorção de água por capilaridade foi medido usando amostras de argamassas sob condições prescritas à pressão atmosférica. O nível da água foi mantido constante durante todo o ensaio e por isso o recipiente foi mantido fechado para que não ocorresse evaporação.

A pesagem dos provetes foi estabelecida pela norma e teve início no instante em que o provete entra em contacto com a água e o coeficiente de absorção é calculado pela seguinte expressão:

$$C = \frac{1 \times 10^{-3}}{(0,04 \times 0,04) \times (10^{0,5} - 90^{0,5})} \times (M2 - M1) = 0,1 \times (M2 - M1) \quad (4.1)$$

Com:

$C$  – coeficiente de absorção capilar ( $kg/m^2 \cdot m^{0,5}$ ).

*M2*- Massa do provete em contacto com a água no instante 90 minutos (g).

*M1* – Massa do provete em contacto com a água no instante 10 minutos (g).

Neste ensaio não foram registadas as alturas de ascensão capilar, uma vez que foi impossível registar o valor com a precisão adequada.

### ***3.3.3- Absorção de água por imersão***

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado segundo a especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil E 394-1993 [68].

Este ensaio foi realizado 28 dias depois dos provetes serem moldados. Os provetes apresentavam uma dimensão de 40x40x160mm<sup>3</sup> de forma prismática. Até ao ensaio estes provetes realizaram a sua cura em câmara húmida.

Inicialmente os provetes foram secos em estufa até atingirem a massa contante. Posteriormente, foram saturados num recipiente com água de consumo a uma temperatura de 20±3°C, até atingirem novamente a massa constante, ou seja, uma variação de massa inferior a 0.1% em medições sucessivas intervaladas de 24 horas. Por último foi determinada a sua massa hidrostática após a saturação. As amostras foram obtidas por rotura dos provetes de dimensões 40x40x160mm<sup>3</sup>, submetidos ao ensaio de flexão.

O resultado do ensaio é dado pela expressão:

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (4.2)$$

Com:

*A<sub>i</sub>* – Absorção de água por imersão (%).

*m1*- Massa do provete saturado ao ar (g).

*m2*- Massa hidrostática do provete saturado (g).

*m3*- Massa do provete seco (g).

### **3.3.4- Massa Volúmica**

A massa volúmica das argamassas foi determinada com base na sua massa e volume do provete no estado endurecido, segundo a expressão 4.3.

$$\gamma = \frac{m}{v} \quad (4.3)$$

Com:

$\gamma$  – Massa volúmica da argamassa ( $kg/m^3$ ).

$m$  – Massa da argamassa (kg).

$v$  – Volume da argamassa ( $m^3$ ).

### **3.3.5- Ensaio de Gelo-Degelo**

Neste ensaios pretende-se determinar a durabilidade da argamassa submetendo os provetes a ciclos de gelo-degelo que foram realizados de acordo com a especificação europeia CEN/TS 12390-9 [69] observando o seu comportamento em relação à velocidade de absorção de água, uma vez que esta característica é importante, porque a argamassa possui uma estrutura porosa.

Pretende-se analisar a capacidade de resistência da argamassa à tensão provocada pelo aumento e diminuição do volume de água quando transita do estado líquido para o sólido, quando a sua composição contém 0%, 5%, 10% e 20% de PCM.

Durante o ensaio os provetes passam por ciclos de temperaturas negativas em que a água, contida nos poros da argamassa, congela e por isso aumenta de volume e logo de seguida passam para ciclos de temperaturas positivas onde essa água congelada passa a líquida e o volume diminui. Essa variação de volume pode causar deterioração das argamassas.

Fisicamente o que acontece é o seguinte: Quando os poros estão saturados, o aumento de volume que resulta da congelação dá origem a pressões nas paredes dos poros o que provocará fissuras levando, no final, à destruição do provete. Quando a temperatura a que os provetes estão submetidos volta a ser positiva (degelo) podem acontecer duas situações: a secagem parcial ou total do provete por evaporação ou a absorção de água por capilaridade.

Os provetes foram colocados em copos individuais para se conseguir conter as perdas de massa resultantes da degradação sofrida durante o ensaio. Os provetes estiveram em contacto com uma lâmina de água de 1,5cm. O ensaio teve a duração de 56 dias, a temperatura mínima foi de -18°C e a temperatura máxima foi de 24°C. Em cada dia de ensaio os provetes são submetidos a variações de temperatura dentro destes valores até que ocorra a sua destruição

A avaliação é realizada com o auxílio de uma balança para quantificar a perda de material e também através de observações periódicas no caso da existência de fissuras. A quantificação da perda de massa dos provetes foi realizada através da realização de sucessivas pesagens previamente estabelecidas. Os intervalos de tempo definidos encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Planificação das medições do ensaio gelo-degelo.

Medição	Ciclo	Instante (h)
1	0	0
2	1	24
3	2	48
4	3	72
5	6	144
6	8	192
7	13	312
8	20	480
9	27	648
10	41	984
11	56	1344

### 3.4- Propriedades mecânicas das argamassas

Neste trabalho foram determinadas três propriedades mecânicas das argamassas, sendo estas a resistência à flexão, resistência à compressão e aderência.

Para avaliar as propriedades mecânicas das argamassas os provetes foram submetidos a temperaturas elevadas de 200°C, 400°C e 600°C. Contudo, é de notar também a existência de uma temperatura de referência de 20°C.

A exposição dos provetes a temperaturas elevadas tem grande interesse nos dias de hoje, uma vez que se encontra associada à resistência ao fogo. Deste advêm muitos problemas mecânicos e os materiais de construção têm diferentes comportamentos.

Os provetes utilizados para avaliar a aderência, resistência à flexão e compressão foram submetidos a temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C durante 4 horas. Sendo que, se utilizou uma mufla com capacidade de conferir as respetivas temperaturas.

Esta caracterização foi realizada para as diferentes composições desenvolvidas. 0% PCM sendo esta a composição de referência e 5%, 10% e 20% de incorporação de PCM.

### ***3.4.1- Ensaio de Aderência***

O ensaio de aderência foi realizado segundo a norma EN 12696 – 12 [70] e permite avaliar a aderência das argamassas aos 28 dias de idade.

Primeiramente coloca-se a argamassa num substrato tradicionalmente utilizado na construção. Depois de 28 dias fazem-se carotes na superfície da argamassa até ao contacto com o substrato. Os elementos do ensaio são circulares com dimensões de 5cm de diâmetro e espaçados entre si com uma distância mínima de 5cm. Seguidamente colam-se peças metálicas com resina epoxídica e após a secagem realiza-se o ensaio (Figura 7). O ensaio consiste no arrancamento do disco metálico por uma força de tração perpendicular à área de teste a uma velocidade constante. Deve ser registada a força máxima aplicada aos elementos de ensaio e o tipo de fratura.

As roturas que podem ser registadas podem ser de três tipos:

- A- Rotura na interface entre a argamassa e o substrato, o valor de teste equivale à tensão adesiva
- B- Rotura na própria argamassa, neste tipo de fratura a tensão adesiva é maior do que o valor de teste.
- C- Rotura no substrato cerâmico, a tensão adesiva é também maior que o valor de teste para este tipo de rotura.



O cálculo da tensão adesiva foi efetuado segundo a seguinte expressão (4.4):

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (4.4)$$

Com:

$R_a$  – Aderência (MPa).

$F$  – Carga de rotura (N).

$A$  – Área de teste em forma circular ( $mm^2$ ).



Figura 7 - Exemplo de carotagem e colagem de discos metálicos no ensaio de aderência.

### **3.4.2- Resistência à flexão**

O processo de mistura e fabrico dos provetes foi efetuado de acordo com norma EN 1015-11 [71].

Para a determinação da resistência à flexão foram moldados 3 provetes prismáticos, com dimensões de  $40 \times 40 \times 160 mm^3$  para cada composição. Depois do fabrico, todos os provetes foram conservados durante 28 dias em câmara húmida, com uma humidade relativa de cerca de 90%.

A determinação da resistência à flexão foi efetuada com controlo de força, a uma velocidade de 50N/s (Figura 8). A grandeza foi determinada com base na expressão (4.5):

$$R_f = 1.5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (4.5)$$

Com:

$R_f$  – Resistência à flexão (MPa).

$F$  – Carga de rotura (N).

$l$  – distância entre apoios (mm).

$b, d$  – altura e largura dos provetes (mm).



Figura 8 - Exemplo do ensaio de flexão realizado sobre provete de referência.

### ***3.4.3- Resistência à compressão***

O ensaio de determinação da resistência à compressão foi realizado com as metades resultantes dos ensaios de flexão.

O comportamento em compressão foi avaliado com controlo de força, efetuando a aplicação da carga no provete a uma velocidade de 150N/s, com recurso a uma peça metálica, suficientemente rígida para uniformizar a carga vertical (Figura 9). A resistência à compressão foi determinada com base na expressão (4.6):

$$R_c = \frac{F}{b \times d} \quad (4.6)$$

Com:

$R_c$  – Resistência à compressão (MPa).

$b, d$  – Altura e largura do provete (mm).

$F$  – Carga de rotura (N).

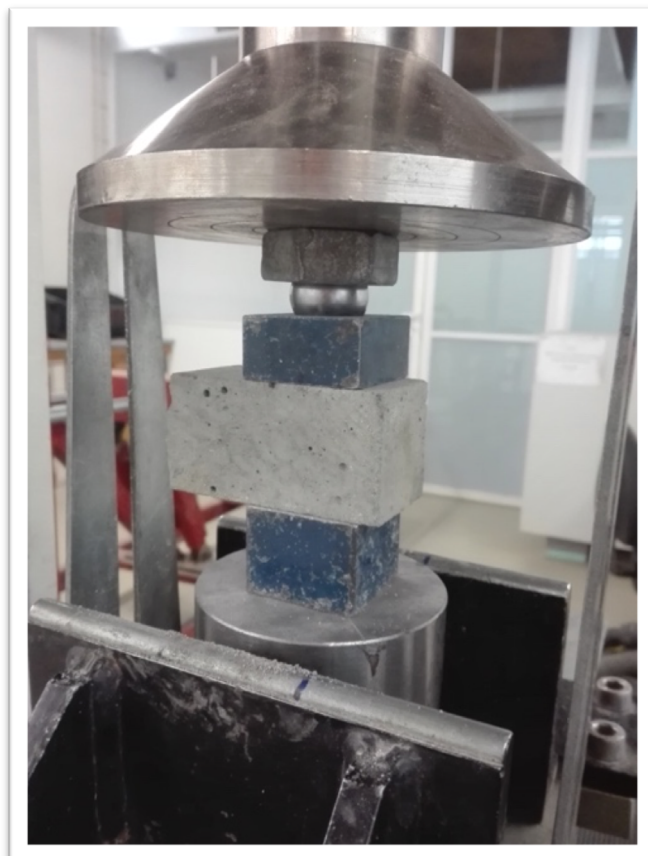


Figura 9 – Exemplo do ensaio de compressão realizado sobre provete de referência.

---

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

---



## 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1- Propriedades físicas

#### 4.1.1- Trabalhabilidade

Os ensaios de trabalhabilidade foram efetuados com base no método da mesa de espalhamento [73] sendo que apenas foram considerados válidos, quando o diâmetro de espalhamento se encontrou compreendido entre  $180 \pm 5$  mm.

Os resultados obtidos (Tabela 6) demonstram que com o aumento do teor de PCM a quantidade de água necessária para a obtenção de uma argamassa homogênea diminuiu (Figura 10). Foi possível verificar que o aumento da percentagem de PCM levou a uma diminuição de 5% na relação água-ligante para as composições contendo 5% e 10% de PCM. No entanto, observa-se uma diminuição de 8% quando se adiciona 20% de PCM na composição da mistura. Este comportamento deve-se ao facto do PCM ser adicionado na forma líquida, funcionando como um agente para a obtenção de uma maior trabalhabilidade.

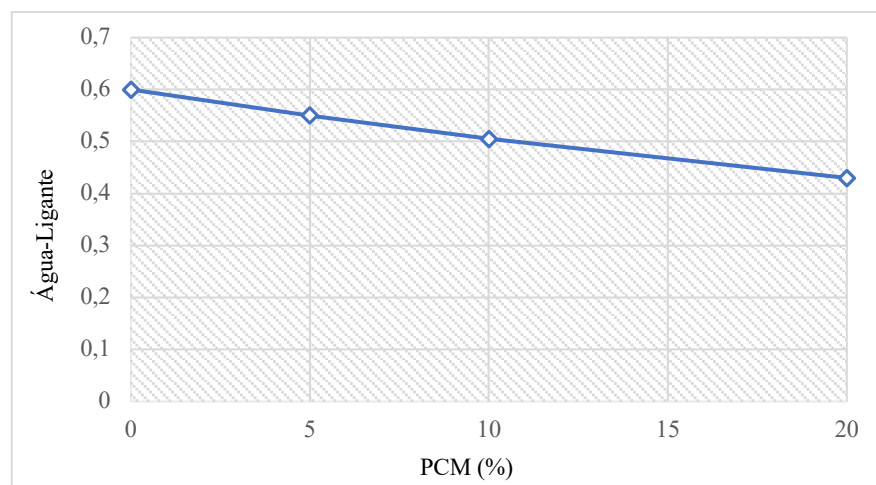


Figura 10 – Relação água/ligante das argamassas

Em relação à razão líquido/ligante (Figura 11) observa-se que o aumento da percentagem de PCM, origina um aumento da grandeza, isto deve-se ao facto do PCM se encontrar no estado líquido.

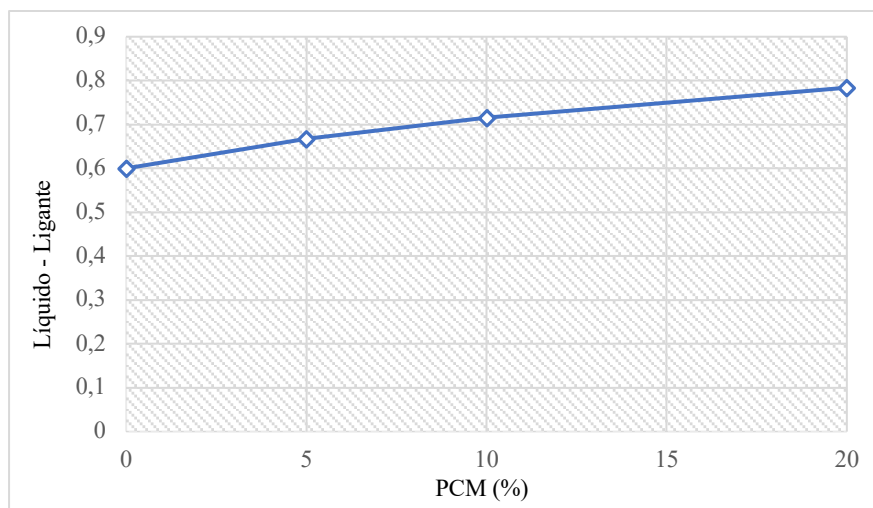


Figura 11 - Razão líquido/ligante das argamassas.

Comparando a argamassa de referência (0% PCM) com as argamassas contendo PCM, podemos observar um aumento da razão líquido/ligante em 18% para a composição com 20% de incorporação de PCM.

#### **4.1.2- Massa volúmica**

A massa volúmica foi determinada tendo em conta a massa e o volume da argamassa. De acordo com a Figura 12 e a Tabela A1, em anexo, foi possível observar uma diminuição da massa volúmica das argamassas quando é incorporado o PCM não-encapsulado. A incorporação de 5% de PCM livre, originou uma diminuição da massa volúmica em cerca de 12% enquanto que a adição de 10% de PCM originou uma diminuição de cerca de 20%.

A diferença mais significativa (32%) verifica-se para a composição com incorporação de 20% de PCM. Este comportamento é justificado pelo aumento do PCM na argamassa cuja massa volúmica é inferior à da areia e da água.

#### **4.1.3 – Absorção de água por capilaridade**

A durabilidade é bastante afetada pela capacidade de absorção de água das argamassas pois determina a facilidade de penetração de agentes agressivos no interior das mesmas. A capacidade de penetração de agentes agressivos é influenciada pela relação água/ligante, finura do ligante, idade, trabalhabilidade e condições de cura.

No gráfico representado na Figura 13 e Tabela A1, em anexo, podemos observar os resultados obtidos para o coeficiente de absorção capilar. É possível observar que a absorção capilar é muito mais baixa para os provetes com adição de PCM. Isto deve-se ao facto destes provetes terem os poros preenchidos com PCM e pela razão água/ligante ser mais baixa nestas argamassas.

A incorporação de PCM livre provocou uma diminuição do coeficiente de absorção capilar de 35%, 33% e 42% para as argamassas aditivadas com 5%, 10% e 20% de PCM, respetivamente, comparativamente com as argamassas de referência.

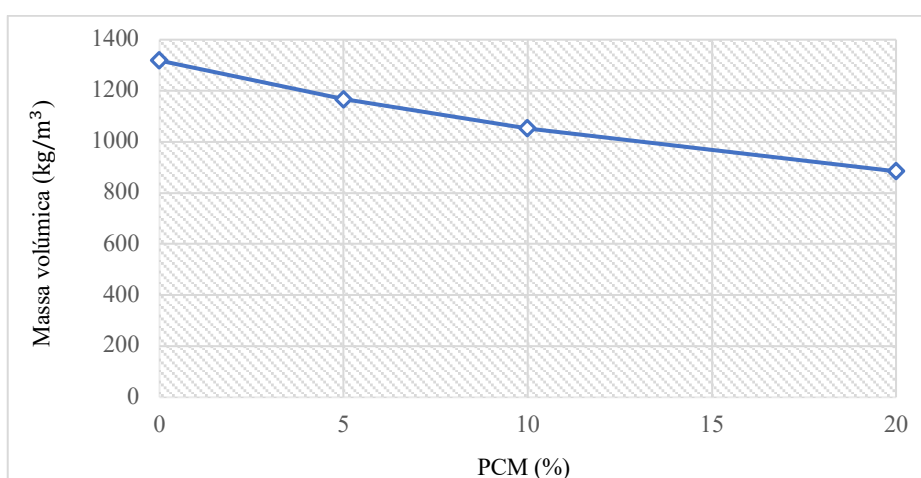


Figura 12 - Variação da Massa Volúmica.

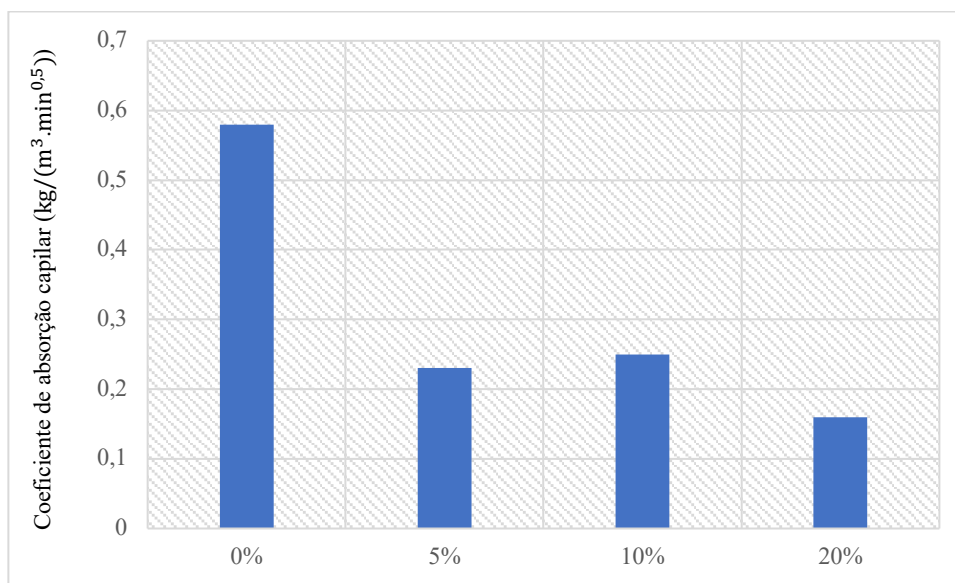


Figura 13 - Variação do coeficiente de absorção capilar.



A Tabela 9 apresenta a classificação, segundo o coeficiente de absorção de água por capilaridade, das diferentes composições estudadas com base na especificação NP EN 998-1:2010 (Tabela 10).

Tabela 9 - Classificação das argamassas segundo o coeficiente de absorção de água por capilaridade, com base na especificação NP EN 998-1:2010.

COEFICIENTE DE ABSORÇÃO CAPILAR	% PCM			
	0%	5%	10%	20%
	0,58	0,23	0,25	0,16
<b>Classificação da argamassa NP EN 998-1:2010</b>	W0	W1	W2	

Tabela 10 - Classificação das propriedades das argamassas endurecidas – retirado da norma NP EN 998-1:2010.

Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
	W1	$c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W2	$c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

#### 4.1.4- Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão está interligada com a presença de poros de maiores dimensões. Os resultados obtidos permitiram verificar que as argamassas contendo PCM não-encapsulado na sua composição são ligeiramente menos sensíveis à absorção de água por imersão. Com o aumento da incorporação de PCM nas argamassas verificou-se um aumento dos vazios (Figura 14 e 15), no entanto, a percentagem de absorção de água diminuiu. Isto deve-se ao facto destas argamassas terem os seus poros preenchidos com PCM não encapsulado.

Na Figura 16 e Tabela A3, em anexo, podemos observar uma diminuição da absorção de água por imersão das argamassas com 5% e 10% de PCM na sua composição. Isto verifica-se devido à presença de PCM que ocupa os poros vazios das argamassas. Este resultado está associado à presença de uma maior razão líquido/ligante que estas composições têm e é explicado pelo facto do PCM adicionado à argamassa estar no estado líquido originando um menor número de vazios nesta argamassa. No entanto, percebe-se que com um aumento de PCM para 20% esta grandeza aumenta. Este resultado demonstra que para valores superior a 10% de PCM ocorre segregação e o PCM apresenta-se à superfície do provete o que

provoca um aumento dos vazios da argamassa. Este aumento, consequentemente, aumenta a absorção de água por imersão.

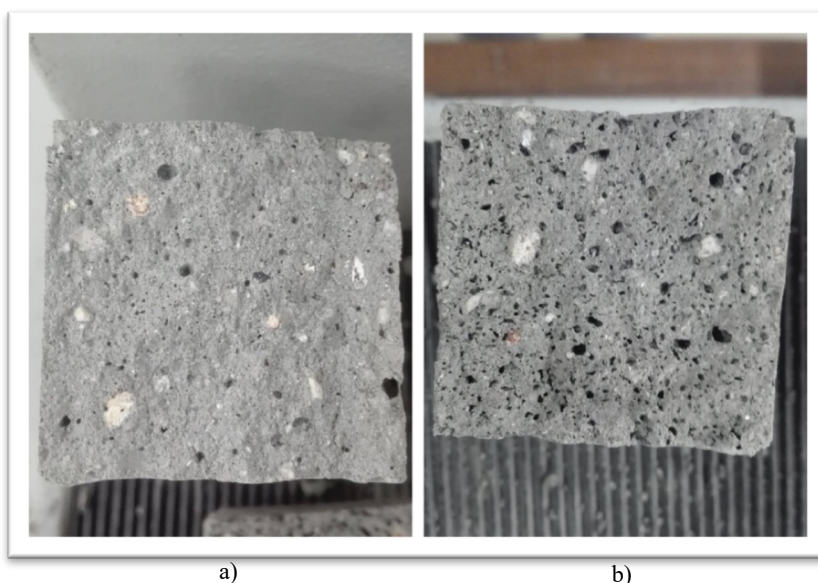


Figura 14 - Pormenor do interior dos provetes. a) contendo 0% PCM na sua composição. b) contendo 5% de PCM na sua composição.

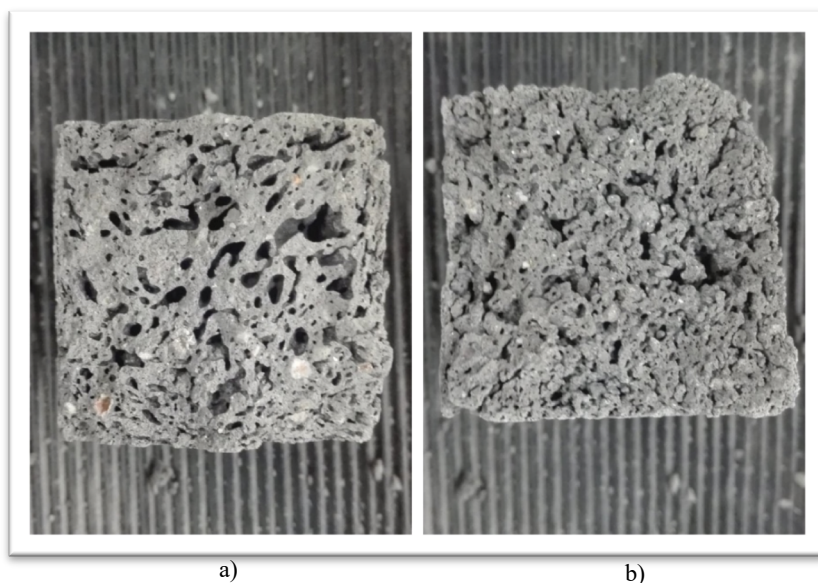


Figura 15 - Pormenor do interior dos provetes. a) contendo 10% PCM na sua composição. b) contendo 20% de PCM na sua composição.

Verifica-se que a incorporação de 5% e 10% de PCM origina uma diminuição de 6% e 7% na absorção de água por imersão, comparativamente à argamassa de referência, enquanto que a argamassa contendo 20% de PCM não apresentou alteração.

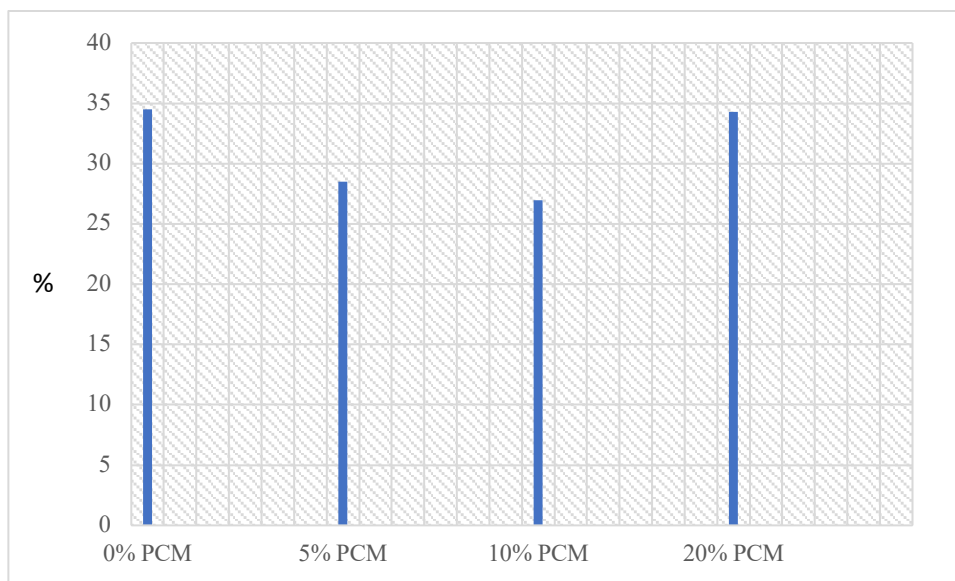


Figura 16 - Variação da absorção de água por imersão das argamassas estudadas.

#### 4.1.5- Gelo-degelo

Os ensaios de gelo-degelo permitem obter informação sobre a durabilidade das argamassas e do seu comportamento a temperaturas negativas.

Para a realização deste ensaio foram utilizados no mínimo 5 provetes de cada composição em estudo com dimensão de  $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}^3$ . Todos os elementos de ensaio foram colocados em copos que permitiram a colocação de uma lâmina de água de 1,5cm assim como conter a perda de massa dentro do recipiente (Figura 17).



Figura 17 - Exemplo dos elementos de ensaio das composições à base de cimento 32.5NR.

A Figura 18 representa o comportamento ao gelo-degelo da argamassa de referência, ou seja, sem incorporação de PCM. Podemos observar que apenas resistiu a 20 ciclos, cerca de 33% da totalidade dos ciclos do ensaio. Apesar da pouca resistência desta argamassa, o seu comportamento, face a esta agressão é gradativo, ou seja, a perda de massa vai acontecendo em cada ensaio. É de notar que a perda total dos elementos de ensaio ocorreu prematuramente ao ciclo 18 sendo que apenas um dos provetes resistiu mais 2 ciclos.

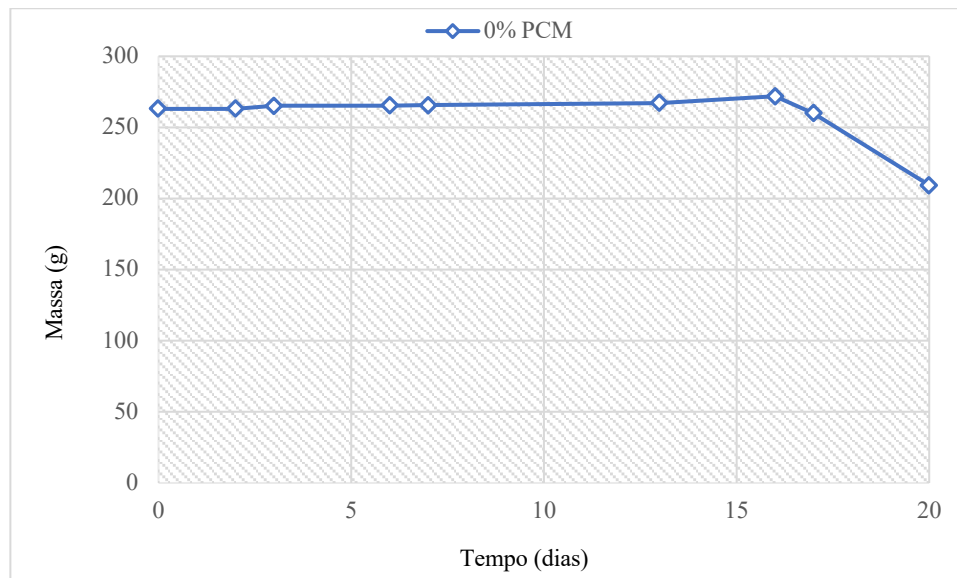


Figura 18 - Comportamento da argamassa contendo 0% PCM ao ensaio gelo-degelo.

Os provetes utilizados apresentaram fendas no 2º ciclo de gelo-degelo (Figura 19a). Sendo que este comportamento se deve à grande quantidade de água contida nos poros. Como já foi referido anteriormente, a presença de água nos poros é a grande responsável pelo aparecimento de fendas devido à sua variação de volume em cada estado. Ao 17º ciclo os provetes apresentaram grandes perdas de material e fendas muito significativas (Figura 19b).

As Figuras 20 e 21 apresentam o comportamento das argamassas contendo 5% e 10% de PCM respetivamente. Estas argamassas apresentam uma maior resistência quando comparadas com a argamassa de referência, uma vez que a sua composição contém PCM não encapsulado que substitui a presença de água nos poros, tal como pode ser observado na Figura 16.

A argamassa com 5% de incorporação de PCM aguentou 29 ciclos enquanto que a de 10% de PCM resistiu 37 ciclos de gelo-degelo. Em termos de perdas de massa não existem

grandes diferenças entre as duas composições. Podemos concluir que apresentam melhor comportamento face à ação do gelo-degelo.

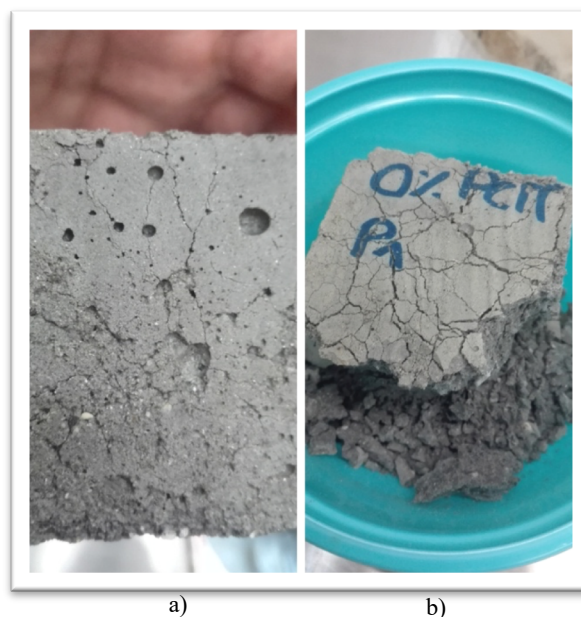


Figura 19 - Provetes aditivados com 0%PCM submetidos ao ensaio gelo-degelo. a) Provates em Ciclo 2. b) Provates em ciclo 17.

Nestas argamassas existiu uma destruição mais lenta ao contrário do que aconteceu com a argamassa de referência. Também as fendas foram aparecendo mais lentamente e em menor quantidade (Figura 22). Apesar da destruição dos provetes da composição 10% de PCM ter ocorrido após a destruição das argamassas dopadas com 5% de PCM o aparecimento de fendas começou no mesmo ciclo. Isto vem comprovar, novamente, que não existem diferenças significativas nas duas composições referidas.

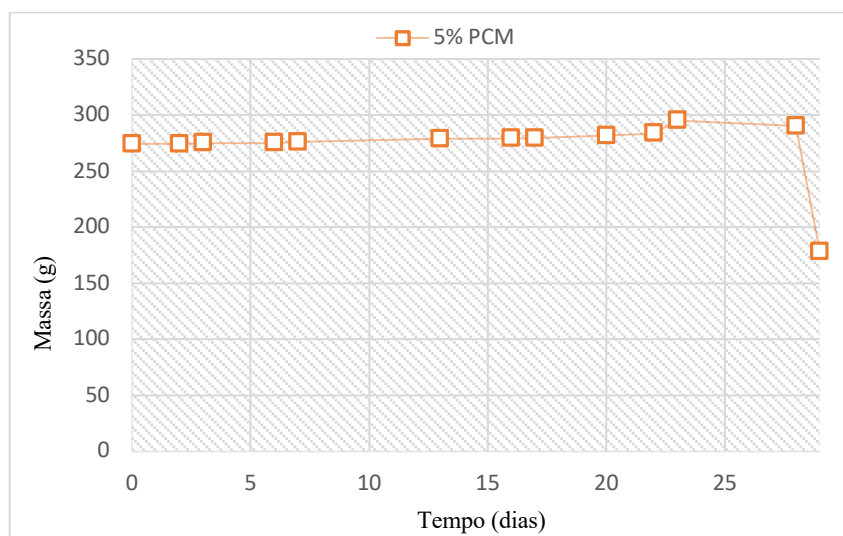


Figura 20 - Comportamento da argamassa contendo 5% PCM ao ensaio gelo-degelo.

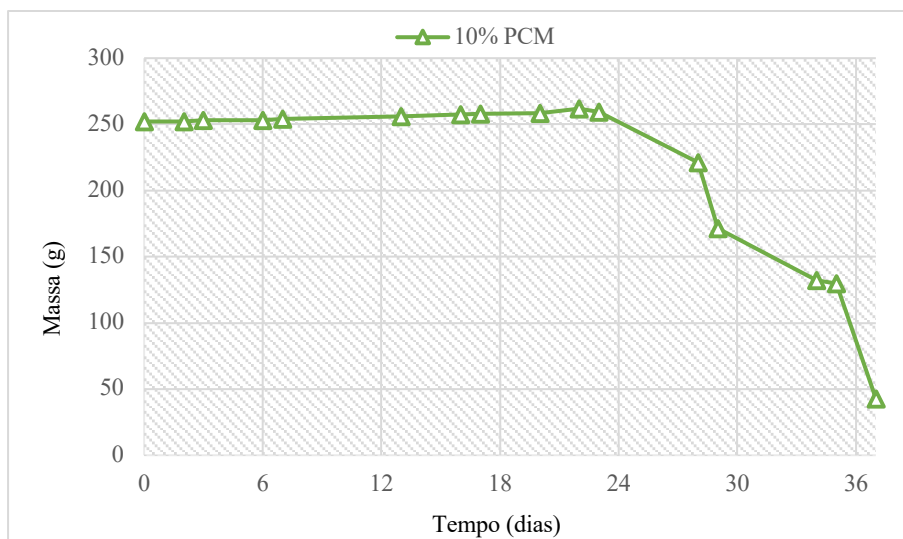


Figura 21 - Comportamento da argamassa contendo 10% PCM ao gelo-degelo.

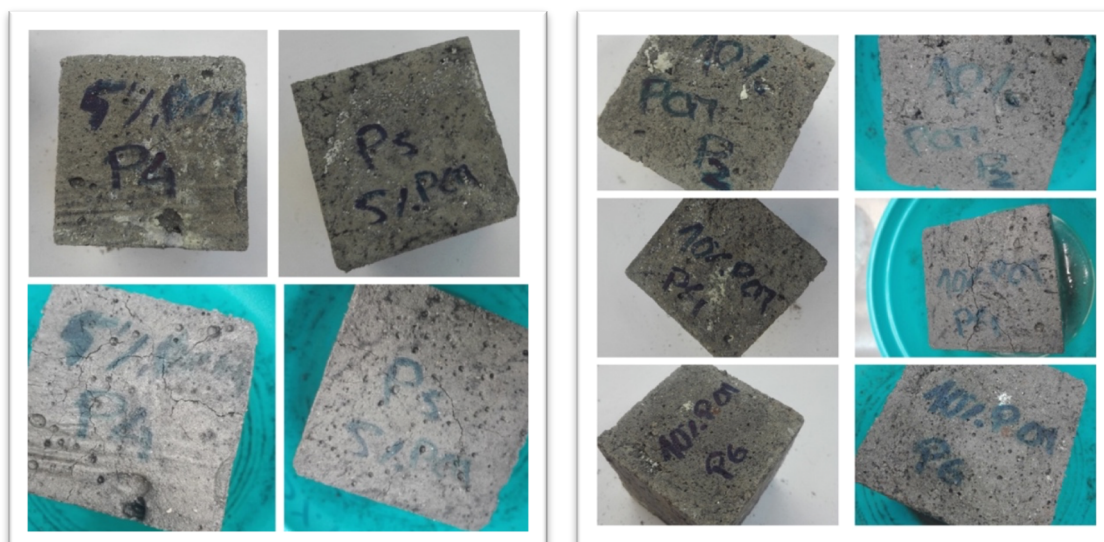


Figura 22 - Aparecimento de Fendas nos provetes com 5% e 10% PCM na sua composição.

Na Figura 23 podemos observar o comportamento da argamassa que contém 20% de PCM na sua composição. Observando a curva podemos constatar que o seu comportamento pouco se alterou nos primeiros 34 ciclos, contudo, depois desse período e ao contrário das argamassas com incorporação de 5% e 10% de PCM estes provetes apresentaram perda de massa. Este resultado deve-se ao facto dos poros destes provetes conterem pouca água pois não apresentam grande capacidade de absorção de água (Figura 16). Esta perda de massa foi bastante lenta. Primeiramente, foram aparecendo fendas, a partir do ciclo número 43 e seguidamente verificou-se uma perda de massa significativa (Figura 24).



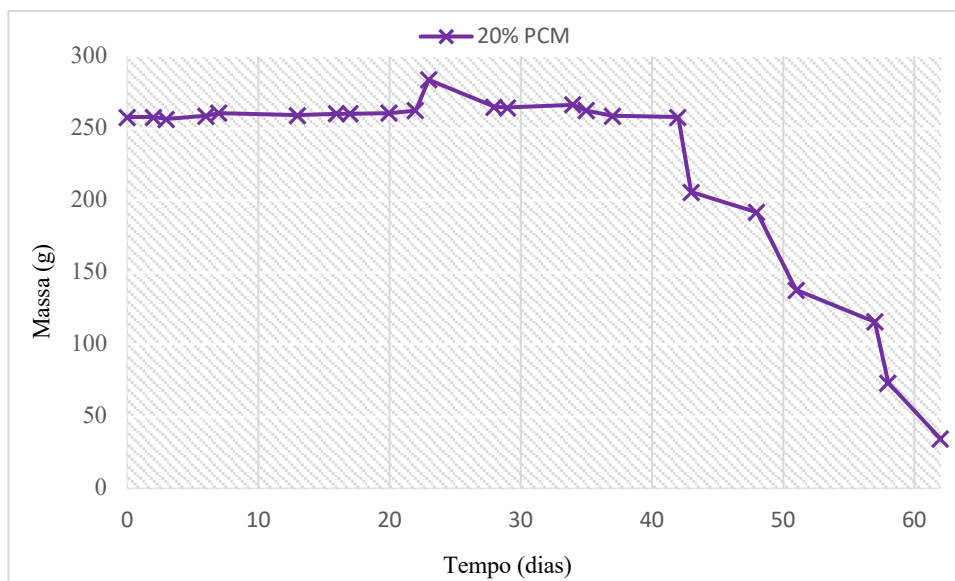


Figura 23 - Comportamento da argamassa contendo 20% PCM ao gelo-degelo.

Também, como aconteceu com as composições com incorporação de 5% e 10% de PCM, estas argamassas foram sendo progressivamente destruídas. Conclui-se, portanto, que esta composição tem um comportamento bastante promissor a este tipo de agressão e uma resistência bastante superior à resistência observada nas composições anteriormente analisadas.

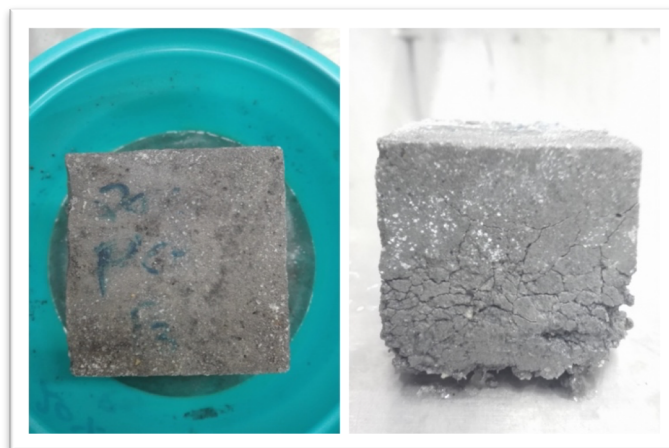


Figura 24 - Fissuras e perdas de massa dos provetes da argamassa contendo 20% de PCM na sua composição.

Analisando todos os resultados de forma conjunta podemos tirar conclusões mais precisas. A figura 26 apresenta o comportamento das argamassas durante o ensaio. Foi possível observar que a argamassa contendo 20% de PCM apresentou uma maior resistência à ação do gelo-degelo. Este comportamento deve-se ao facto de não existirem grandes perdas de

massa iniciais. No entanto, a argamassa mais sensível a esta agressão é a argamassa de referência (0% PCM) uma vez que perdeu todos os elementos de ensaio nos primeiros ciclos.

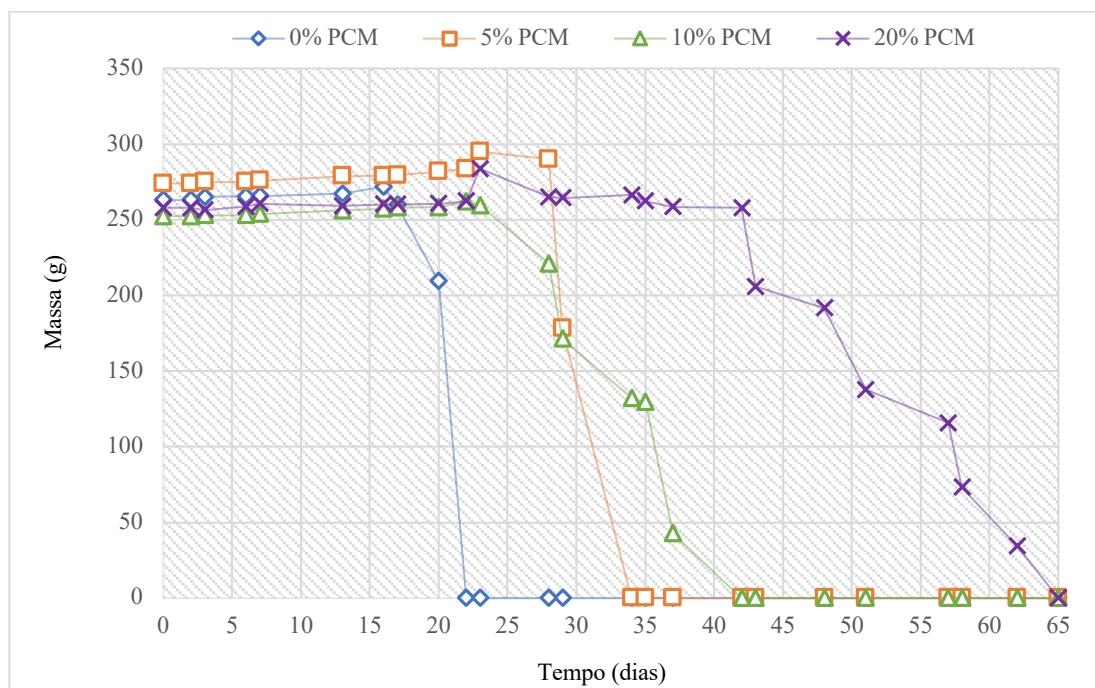


Figura 25 - Perda de massa das argamassas durante os ensaios de gelo-degelo.

As argamassas com incorporação de 5% e 10% de PCM foram agredidas de forma idêntica, porém a composição de 20% de PCM é mais resistente a esta agressão. Com esta informação podemos concluir que a incorporação de PCM não altera significativamente, nem negativamente, o desempenho das argamassas face à ação de gelo-degelo. Contudo, o mesmo não pode ser observado para a argamassa de referência que apresenta uma perda muito significativa de massa.

A Tabela 11 apresenta as perdas de massa que os provetes sofreram durante a realização do ensaio de gelo/degelo. Foi possível observar que a perda de massa foi mais lenta nos provetes com adição de PCM comparativamente à composição de referência. Ainda foi possível observar que a perda total de massa dos provetes para a argamassa sem incorporação de PCM ocorreu no ciclo 19 enquanto que para a composição com 20% de PCM a perda total de massa ocorreu no ciclo 55.

Com base em todos estes dados é possível observar que a incorporação de material de mudança de fase conduziu a menores perdas de material durante a ação de gelo-degelo



mostrando que a incorporação de PCM livre torna as argamassas mais resistentes a este tipo de ataque (Figura 26).

Tabela 11 - Perdas de massa ocorridas durante o ensaio de gelo-degelo (%)

<b>Ciclo</b>	<b>0% PCM</b>	<b>5% PCM</b>	<b>10% PCM</b>	<b>20% PCM</b>
0	0	0	0	0
2	20±	16	20	15
3	20	16	20	15
6	20	16	20	15
7	20	15	20	15
13	19	15	19	15
16	18	14	18	15
17	21	14	18	15
20	37	14	18	15
22	100	13	17	15
23	100	10	18	15
28	100	11	30	15
29	100	45	46	15
34	100	100	58	15
35	100	100	59	15
37	100	100	86	15
42	100	100	100	15
43	100	100	100	20
48	100	100	100	20
51	100	100	100	28
57	100	100	100	28
58	100	100	100	37
62	100	100	100	53
65	100	100	100	100

É possível ainda observar que estes resultados se encontram relacionados com o facto de existir uma menor razão de água/ligante e dos poros das argamassas se encontrarem parcialmente ou totalmente ocupados pelo PCM.

## 4.2- Propriedades mecânicas

### 4.2.1- Comportamento à flexão e compressão

Para avaliação do comportamento mecânico, segundo a determinação da resistência à flexão e compressão recorreu-se à norma EN 1015-11 [74].

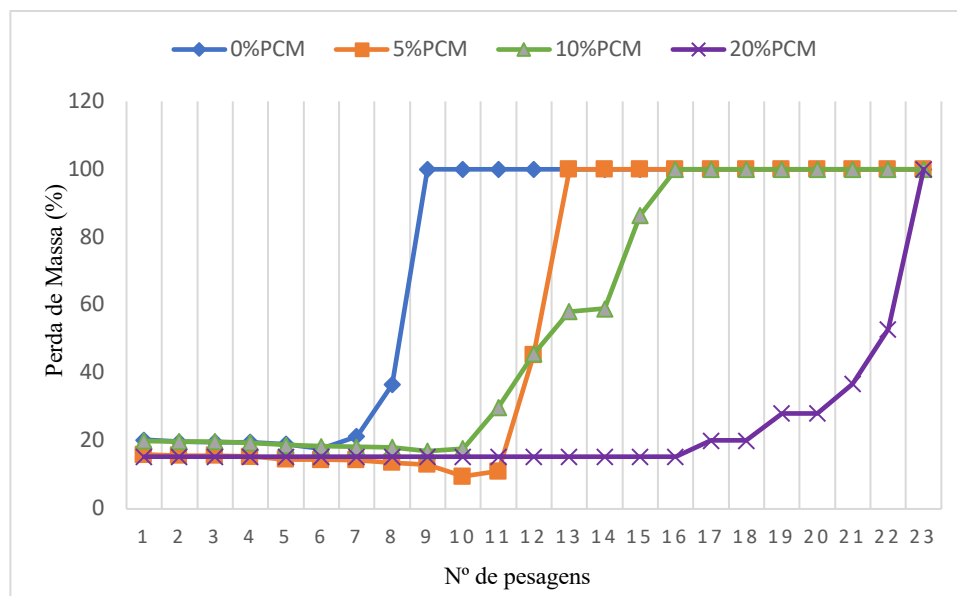


Figura 26 - Perdas de massa ocorridas durante o ensaio de gelo-degelo

De acordo com a Figura 27, é possível verificar que a incorporação de PCM provocou uma ligeira diminuição da resistência à compressão. É possível ainda observar que com o aumento da temperatura essa resistência diminuiu bastante. O mesmo se pode observar no comportamento à flexão (Figura 28 e Tabela A4, em anexo). Este comportamento está associado à razão líquido/ligante que aumenta com o aumento da percentagem de PCM na formulação das argamassas, uma vez que foi adicionado no estado líquido. Este aumento da razão líquido/ligante provoca um aumento dos poros.

É possível observar que o comportamento destas argamassas é melhorado quando submetidas a 200°C ao contrário do comportamento aos 400°C e 600°C. Esta melhoria encontra-se relacionada com o processo de cura dos ligantes, sendo que a temperatura acelera o processo de hidratação do cimento. As argamassas de referência, expostas à temperatura de 20°C, apresentaram um comportamento superior ao comportamento das argamassas expostas a 400°C e 600°C. Este comportamento encontra-se associado, novamente, ao processo de cura dos ligantes que ocorre muito mais rápido nestas temperaturas.

Avaliando o comportamento à flexão verificou-se um aumento de 49% e uma redução de 1% e 30% para as argamassas com incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM, respetivamente, quando sujeitas a temperaturas de 200°C. Nas argamassas com adição de 10% e 20% de PCM, a perda de resistência devido à incorporação de PCM sobrepõe-se ao ganho de resistência associado à aceleração do processo de cura. Foi ainda possível verificar

que para temperaturas de 400°C e 600°C a resistência sofreu reduções acentuadas, sendo que para esta última temperatura os valores da perda de resistência rondam os 80%. Este comportamento deve-se ao aparecimento de microfissuras na matriz da argamassa, uma vez que se geram pressões de vapor internos.

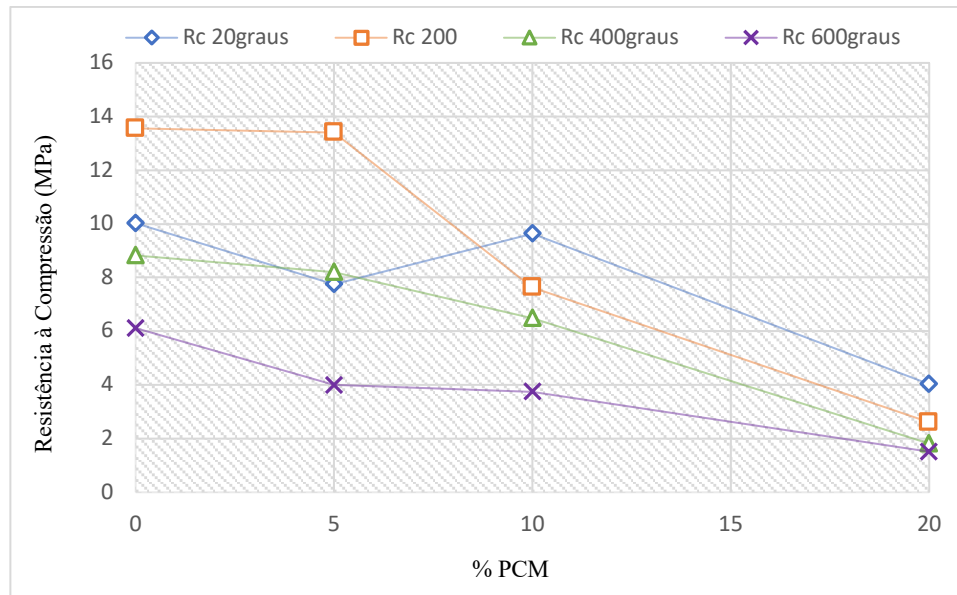


Figura 27 - Comportamento à compressão das argamassas sujeitas a temperaturas de 20°C, 200°C, 400°C e 600°C.

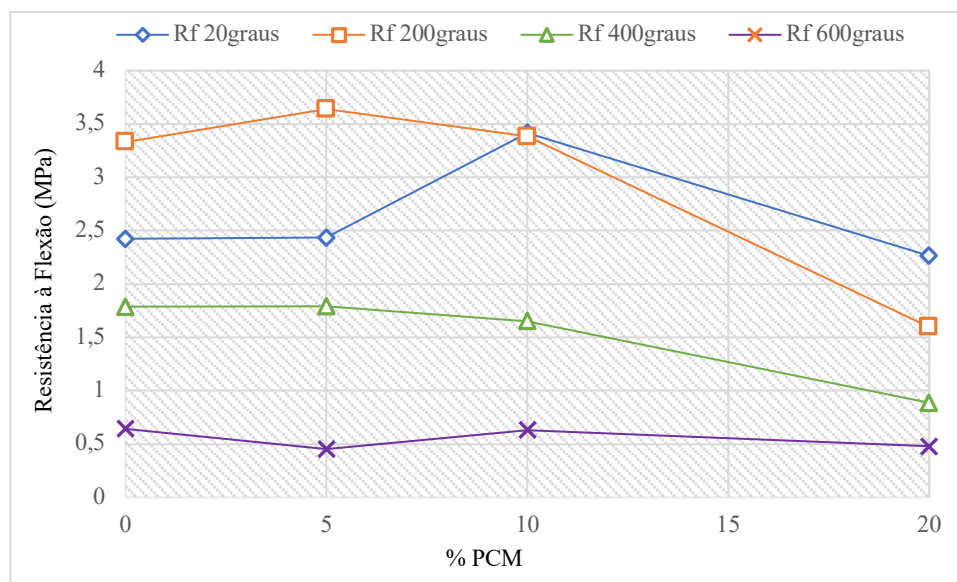


Figura 28 - Comportamento à flexão das argamassas sujeitas a temperaturas de 20°C, 200°C, 400°C e 600°C.

Relativamente aos resultados dos ensaios de resistência à compressão observou-se que quando sujeitas a 200°C as argamassas de 10% e 20% apresentaram uma diminuição da resistência em 21% e 35% enquanto que a argamassa de 5% obteve uma melhoria de 73%

em relação à argamassa de referência. As argamassas de 10% e 20% de PCM, sujeitas a uma temperatura de 400°C reduziram a sua resistência à compressão em 33% e 55% enquanto que na argamassa contendo 5% de PCM não se verificou alteração significativa. Para a temperatura de 600°C o comportamento das argamassas relativamente à argamassa de referência, foi uma redução de 48%, 61% e 62% para as argamassas dopadas com 5%, 10% e 20% de PCM, respetivamente. Nas argamassas com incorporação de 10% e 20% de PCM, a perda de resistência devido à incorporação de PCM sobrepõe-se ao ganho de resistência associado à aceleração do processo de cura.

Com o objetivo de avaliar a adequabilidade das argamassas desenvolvidas para aplicação no setor da construção, foi realizada a sua classificação segundo a resistência à compressão. A Tabela 12 apresenta as classificações obtidas, de acordo com a especificação NP EN 998-1:2010. É possível verificar que existem classificações bastante distintas. As argamassas com incorporação de 20% de PCM são as que apresentam classificação mais baixa, mas variam entre a CS III para a temperatura de referência e CS II quando sujeitas a elevadas temperaturas. Apesar das baixas resistências a esta agressão verifica-se que estas argamassas têm uma boa classificação.

#### ***4.2.2- Aderência***

A aderência é uma propriedade mecânica e depende da capacidade de penetração da argamassa nos poros ou entre as rugosidades do substrato. A avaliação deste fenómeno teve como base a norma EN 1015-12 [74] e permitiu avaliar a aderência das argamassas aos 28 dias de idade submetidas a temperaturas de 20°C (referência), 200°C, 400°C e 600°C. A avaliação da aderência foi realizada para as diferentes composições desenvolvidas.

Os resultados obtidos permitiram verificar uma diminuição da aderência com a incorporação de PCM que pode ser justificada pela diminuição da razão água/ligante e pelas características do PCM no estado líquido. A composição de referência apresentou uma aderência superior às composições contendo PCM independentemente da temperatura de exposição. O aumento da temperatura originou uma diminuição da aderência. Isto deve-se ao facto de o aumento da temperatura promover uma dilatação dos materiais das argamassas. Esta dilatação fica impedida pela aderência ao substrato.

Tabela 12 - Classificação das argamassas em relação à resistência à compressão pela especificação NP EN 998-1:2010.

<b>Temperatura</b>	<b>% PCM</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Classificação da argamassa NP EN 998-1: 2010</b>
<b>20°C</b>	0%	10,1±6,25	CS IV
	5%	7,8±11,35	CS IV
	10%	9,6±8,43	CS IV
	20%	4,1±29,02	CS III
<b>200°C</b>	0%	13,6±3,57	CS IV
	5%	13,4±2,65	CS IV
	10%	7,6±18,91	CS IV
	20%	2,6±18,58	CS II
<b>400°C</b>	0%	8,8±15,04	CS IV
	5%	8,2±3,86	CS IV
	10%	6,5±12,02	CS IV
	20%	1,8±12,73	CS II
<b>600°C</b>	0%	6,1±5,32	CS III
	5%	3,9±8,04	CS III
	10%	3,7±8,73	CS III
	20%	1,5±32,77	CS II

Não foi possível obter qualquer valor de aderência para a temperatura de 600°C pois a exposição a esta temperatura levou à destruição dos elementos de ensaio (Figura 29).

A Figura 30 e Tabela A5, em anexo, apresenta os resultados de aderência para cada tipo de argamassa. É possível verificar que com o aumento da temperatura a aderência diminui. Foi também possível analisar o tipo de rotura que as argamassas tiveram sendo que o tipo de rotura foi na interface tijolo/argamassa (Figura 31).

O maior valor de aderência foi determinado nas argamassas expostas a 20°C para a argamassa de referência (0% de PCM) e o menor valor foi o das argamassas com adição de 20% de PCM. Foi possível observar que com o aumento da temperatura e aumento da percentagem de PCM livre na sua composição o valor da aderência diminui. Pode ser observado que para os 600°C não foi possível realizar o ensaio e que as argamassas expostas a 400°C obtiveram o mesmo valor de aderência e isto demonstra que a percentagem de PCM nada altera o comportamento das argamassas a altíssimas temperaturas.



Figura 29 - Argamassa à base de cimento submetida a 600°C.

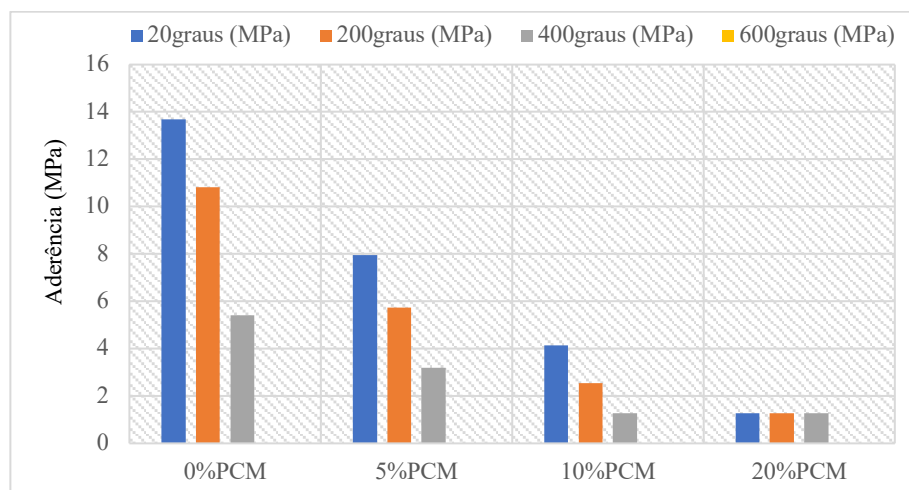


Figura 30 - Variação da aderência com a adição de PCM e com a temperatura nas argamassas.



Figura 31 - Rotura nas argamassas à base de cimento quando sujeitas a ensaios de aderência.

---

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES

---





## 5- CONCLUSÕES

A realização desta investigação permitiu concluir que a incorporação de material de mudança de fase não-encapsulado em argamassas para revestimento no interior dos edifícios provoca ligeiras alterações nas suas propriedades nos estados fresco e endurecido.

Relativamente à trabalhabilidade das argamassas verificou-se que a incorporação de PCM livre, origina uma diminuição da razão água-ligante e um aumento na razão líquido-ligante. Este comportamento encontra-se associado ao facto do PCM ser incorporado nas argamassas no estado líquido, podendo funcionar como um agente para a obtenção de uma argamassa homogénea independentemente de não funcionar como um aglutinante.

Em relação à absorção de água concluiu-se que a incorporação de PCM melhorou o comportamento das argamassas. A presença do material de mudança de fase resultou num menor número de vazios e por isso estas argamassas são menos sensíveis à absorção de água. Foi possível concluir que existe uma percentagem de incorporação de PCM máxima para estas argamassas, uma vez que com a adição de 20% de PCM os valores de absorção de água não foram atrativos o que permite concluir que existe um limite de incorporação e que ultrapassando os resultados serão menos agradáveis.

No que diz respeito ao comportamento das argamassas face a ações de gelo-degelo, foi possível concluir que a incorporação de material de mudança de fase melhorou o desempenho das argamassas, conduzindo a menores perdas de material durante a ação do gelo-degelo. Este comportamento encontra-se relacionado com o facto de existir uma menor razão de água-ligante nas argamassas com incorporação de PCM e também pelo facto de grande parte dos poros das argamassas se encontrarem preenchidos com o PCM, cuja variação de volume durante a transição de fase é inferior à variação de volume da água.

Por último, no que diz respeito ao comportamento mecânico das argamassas verificou-se para todas as temperaturas testadas, 20°C (temperatura ambiente), 200°C, 400°C e 600°C, uma diminuição da resistência à flexão e compressão. Este comportamento encontra-se associado à presença de uma maior quantidade de material líquido nas argamassas, originando uma maior quantidade de poros nas mesmas. Verificou-se ainda que a submissão das argamassas a uma temperatura de 200°C provoca uma melhoria no seu comportamento

mecânico, o que se encontra relacionado com o facto de a temperatura poder acelerar o processo de hidratação do cimento. Contudo, para a exposição das argamassas a uma temperatura de 400°C e 600°C, verificou-se uma diminuição das suas resistências mecânicas, o que pode ser justificado pelo facto das argamassas dilatarem e se desenvolverem microfissuras e pelas mudanças de fase, deixando-as muito fragilizadas.

A aderência apresentou ser muito menor em argamassas aditivadas com PCM e quanto mais PCM a argamassa contém menor é a aderência. Isto deve-se ao facto do PCM livre ter um aspeto gorduroso e não ter capacidade aglutinante. Concluiu-se também que com o aumento da temperatura também diminuiu a aderência das argamassas.

Estas argamassas apresentam, no geral, um bom desempenho permitindo reduzir os impactos ambientais por isso é possível concluir que a entrada no mercado deste material será uma solução construtiva funcional e com grande capacidade de adaptação à construção nova e à reabilitação.

É necessário referir que as conclusões referidas têm por base as condições laboratoriais, equipamentos e materiais utilizados neste trabalho e por isso apresentam as limitações associadas a todos esses parâmetros.

## **5.1- Trabalhos futuros**

A investigação realizada obteve bons resultados relacionados com o aumento da capacidade de resistência ao gelo-degelo das argamassas estudadas. No entanto, outros trabalhos podem ser realizados para testar até que ponto estas argamassas são uma mais valia para as construções.

Estas necessidades de investigação prendem-se nos seguintes aspetos:

- Estudar a aderência das argamassa aditivadas com PCM não encapsuladas em diferentes materiais.
- Estudar o comportamento térmico das argamassas aditivadas com PCM não encapsulado de forma a avaliar o verdadeiro comportamento em casos reais.

- Efetuar um estudo mais detalhado sobre a forma como o PCM não encapsulado deve ser incorporado para que a sua composição seja viável e fácil de realizar.
- Realizar o estudo económico sobre estas argamassas.
- Desenvolver argamassas à base de outros ligantes como cal aérea, cal hidráulica e gesso, incorporando PCM não encapsulado e estudar a possibilidade de serem aplicadas na construção.



---

# CAPÍTULO 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---



## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PORDATA, Base de Dados Portugal Contemporâneo, <http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+eléctrica+total+e+por+sector+de+a+atividade+económica-1125> , visitado em 6/02/2017.
- [2] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN), EN 1015-11, “Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strenght of hardened mortar, Brssels, 2006.
- [3] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN), CEN/TS 12390-9, Testing hardened concrete -Part 9: Freeze-thaw resistance, Brussels, 2006.
- [4] Cunha.S., Carneiro.L., Aguiar-B.J., Torgal-Pacheco.F. Comportamento de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase submetidas a elevadas temperaturas. REVISTA ENGENHARIA CIVIL, 50, 71-83, 2014.
- [5] Cunha.S., Aguiar.J., Ferreira.V., Tadeu.A. Argamassas com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase (PCM): Caracterização física, mecânica e durabilidade. REVISTA MATÉRIA V.20, Vo1, 245-261, 2015.
- [6] Veiga, Rosário.M, Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes. Actas do 3º ENCORE, Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, Maio de 2003.
- [7] Couto, A.B.B, Couto. J. P, Especificidades e Exigências das Argamassas na Reabilitação de Edifícios Antigos, Repositorium Universidade do Minho.
- [8] Veiga, M. Rosário; Carvalho, Fernanda – Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos. Requisitos e características a respeitar. Lisboa: LNEC, Cadernos de Edifícios, nº 2, Outubro de 2002.
- [9] Ferreira Pinto.A. P, Augusto Gomes, Bessa Pinto, “Argamassas”, 2006.
- [10] <http://www.itecons.uc.pt/projectos/argamassas2018/index.php?module=sec&id=681>, visitado em 18/08/2018
- [11] [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA\\_Solar\\_HC\\_Roadmap\\_FoldOut\\_Print.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_Solar_HC_Roadmap_FoldOut_Print.pdf), visitado em 30/08/2018.
- [12] Cunha. S.R.L, Aguiar. J.L.B, Ferreira. V.M.C.S, Tadeu. A.J.B, “Desenvolvimento e Caracterização de Argamassas com Incorporação de Materiais de Mudança de Fase”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Junho de 2018.



- [13] <http://admin.indiaenvironmentportal.org.in/files/SBCI-BCCSummary.pdf>, visitado em 30/08/2018.
- [14] <http://www.iea.org/Textbase/npsum/building2013SUM.pdf>, visitado em 2/08/2018.
- [15] <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:en:PDF>, visitado em 15/09/2018.
- [16] [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014\\_final\\_report\\_eu\\_building\\_heat\\_demand.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_final_report_eu_building_heat_demand.pdf), visitado em 15/09/2018.
- [17] Brasileiro.L.L, Matos.J.M.E, Revisão Bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil, Centro de Tecnologia – Cerâmica 61, 178-189, 2015.
- [18] Konstantinidou.C.V., Novoselac.A., Integration of Thermal Energy Storage in Buildings, Univ. Tex., Austin, 2010.
- [19] US Environmental Protection Agency, Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2008, US EPA430-R-10-006, Washington DC, USA.
- [20] Pérez-Lombard.L., Ortiz.J., Pout.C., A review on buildings energy consumption information, Energy Build. 40, 394–398, January 2008.
- [21] Artmann.N, Jensen.R.L., Manz.H., Heiselberg.H., Experimental investigation of heat transfer during night-time ventilation, Energy Build. 42, 366–374, March, 2010.
- [22] [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014\\_final\\_report\\_eu\\_building\\_heat\\_demand.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_final_report_eu_building_heat_demand.pdf), visitado em 5/8/2018.
- [23] European Commission, Joint Research Centre, and European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (RTE-Platform), 2020-2030-2050, c Ommon Vision for the Renewable Heating and Cooling Sector in Europe: European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, EUR-OP, Luxembourg, 2011.
- [24] Wang.X., Chen.D, Ren.Z, Global warming and its implication to emission reduction strategies for residential buildings, Build. Environ. 46, 871–883, April, 2011.
- [25] Pérez-Lombard.L., Ortiz.J., Pout.C., A review on buildings energy consumption information, Energy Build. 40, 394–398, January, 2008.
- [26] Agence internationale de l'énergie and Organisation de coopération et de développement économiques, Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050: In Support of the G8 Plan of Action, OECD, IEA, Paris, 2006.
- [27] Rao.V.V., Parameshwaran.R., Ram.V.V, PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends, Energy and Buildings 158 95-122.
- [28] J. Aguiar, S. Cunha, M. Kheradmand, Mortars with phase change materials: contribute to sustainable construction, Key Eng. Mater. 634, 3–13, 2015.

- [29] Cao.X., Dai.X, Liu.J, Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy Build.* 128, 198–213, 2016.
- [30] Wahid.M.A., Hosseini.S.E., Hussen.H.M., Akeiber.H.J., Saud.S.N., Mohammad.A.T, An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region, *Appl. Therm. Eng.* 112, 1240–1259, 2017.
- [31] Maciel, L. L., Barros, M., Sabbatini, F. H,Recomendações para execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos”. Artigo científico, São Paulo 1998.
- [32] Silva. T, Comportamento Mecânico de Argamassas de Reboco com Regranulado Negro de Cortiça., Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Julho 2008.
- [33] Pinto, A.; Gomes, A.; Pinto, J., Argamassas., Documento de apoio à disciplina de Materiais de Construção II, Instituto Superior Técnico, Lisboa 2013.
- [34] Galvão, J., Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas - Esclerómetro e ultra-sons, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Novembro 2009.
- [35] Lazera, R.F, Avaliação do desempenho mecânico de argamassas térmicas em protótipos de parede, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Técnico de Lisboa, Outubro 2016.
- [36] Farid.M.M., Khudhair .A.M., Razack.S.A.K., Hallaj. S. Al, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Convers. Manage.* 45, 1597–1615, June 2004.
- [37] Kos’ny.J, PCM-Enhanced Building Components, Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [38] Mehling.H, Cabeza.L.F., Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction in to Basics and Applications, Springer, 2008.
- [39] Rao.V.V., Parameshwaran.R., Ram.V.V, PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends, *Energy and Buildings* 158, 95-122, 2018.
- [40] Silva. P.J.S.P, Henriques. M.D.S.F, “Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, ISEL, 2013.

- [41] Zhang.Y, Ding.J, Wang.X, Yang.R, Lin.K, Influence of additives on thermal conductivity of shape-stabilized phase change material, *Sol. Energy Mater. Sol.Cells* 90, 1692–1702, 2006.
- [42] Butala.V, Stritih.U, Experimental investigation of PCM cold storage, *Energy Build*, 354–359, 2009.
- [43] Durães.T.B.D, Silva.S.M, Identificação do tipo e Quantidade de PCM Adequado ao Clima Português – Lisboa, Tese de Mestrado Grau de Mestre em Engenharia Civil, Outubro 2013.
- [44] Cabeza.L.F., Castell.A, Barreneche.C, Gracia.A, Fernandez.A.I., Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1675–1695, 2011.
- [45] Zhang.Y.P., Lin.K.P., Yang.R, Di.H.F., Jiang.Y, Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, *Energy Build.* 38, 1262–1269, 2006.
- [46] Farah.S, Farouk.F, Pascal-Henry.B, Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review, *Energy and Buildings* 129, 396–431, 2016.
- [47] Castell A, Martorell I, Medrano M, Perez G, Cabeza LF. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy Build*; 42:534–40, 2010.
- [48] Hawlader MN, Uddin MS, Zhu HJ. Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: experiments and simulation. *Int J Energy Res*, 2010.
- [49] Konstantinidou.C.V., Novoselac.A, Integration of Thermal Energy Storage in Buildings, Univ. Tex., Austin, 2010.
- [50] Hawes D., Banu D., Feldman D.; Latent heat storage in concrete, *Solar Energy Materials*, Vol. 19, pp. 335-348, 1989.
- [51] Memon, S. A.; Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, *Renew-able and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 870-906, 2014.
- [52] Du K. et al, *Applied Energy* 220, 242–273, 2018.
- [53] Eddhahak.A, Drissi.S, Colin.J, Caré.S, Neji.J, Effect of phase change materialson the hydration reaction and kinetic of PCM-mortars, *J. Therm. Anal.Calorim.* 117, 537–545, 2014.
- [54] <http://www.solardecathlon.gov/history.html>, visitado em 5/09/2018.
- [55] Lai C., Chen R., Lin C.; Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM, *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp.1259-1266, 2010.

- [56] Athienitis A., Liu C., Hawes D., Banu D., Feldman D.; Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage, *Building and Environment*, Vol.32, pp. 405-410, 1997.
- [57] Shilei L., Neng Z., Guohui F.; Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in winter, *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 18-24, 2006.
- [58] Darkwa K., O'Callaghan P., Tetlow D.; Phase-change drywalls in a passive-solar building, *Applied Energy*, Vol. 83, pp. 425-435, 2006.
- [59] Sakulich.A.R., Bentz.D.P., Incorporation of phase change materials incementitious systems via fine lightweight aggregate, *Constr. Build. Mater.* 35483–490, 2012.
- [60] Nagano K., Takeda S., Mochida T., Shimakura K., Nakamura T.; Study of a Floor Supply Air Conditioning System Using Granular Phase Change Material to Augment Building Thermal Mass Storage – Heat Response in Small Scale Experiments, *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 436-446, 2006.
- [61] Lin K., Zhang Y., Xu X., Di H., Yang R., Qin P.; Experimental Study of Under- Floor Electric Heating System with Shape-Stabilized PCM Plates, *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 215-220, 2005.
- [62] Rodriguez-Ubinas.E., Ruiz-Valero.L., Vega.S, Neila.J, Applications of phase change material in highly energy-efficient houses, *Energy Build.* 50, 49–62, 2012.
- [63] Sharma A., Tyagi V., Chen C., Buddhi D.; Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 318-345, 2009.
- [64] Griffiths P., Eames P.; Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1756-1760, 2007.
- [65] Zhou G., Zhang Y., Zhang Q., Lin K., Di H.; Performance of a Hybrid Heating System with Thermal Storage Using Shape-Stabilized Phase-Change Material Plates, *Applied Energy*, Vol. 84, pp. 1068-1077, 2007.
- [66] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1999.
- [67] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-18, Methods of test for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, 2002.
- [68] Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Especificação E 394, Betões - Determinação da absorção de água por imersão, 1993.

- [69] European Committee for Standardization (CEN), CEN/TS 12390-9, Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance, 2006.
- [70] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-12, Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, 2000.
- [71] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-11, Methods of test for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999.
- [72] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 1999.
- [73] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-12, Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, 2000.

---

# ANEXOS

---



## 7- Anexos

Tabela A13- Massa volúmica.

<b>% PCM</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0	1840,1±3,1
5	1638,7±6,0
10	1496,6±11,2
20	1290,2±10,1

Tabela A14 – Coeficiente de absorção capilar

<b>% PCM</b>	<b>Coeficiente de absorção capilar (kg/(m<sup>3</sup>. min<sup>0,5</sup>))</b>
0	0,58±0,17
5	0,23±0,05
10	0,25±0,03
20	0,16±0,03

Tabela A15 - Absorção de água por imersão.

<b>% PCM</b>	<b>Absorção de água por imersão (%)</b>
0%	34,48±8,69
5%	28,51±3,57
10%	26,51±2,29
20%	34,30±18,7

Tabela A4 - Resistência à flexão a elevadas temperaturas.

<b>% PCM</b>	<b>Rf 20°C MPa</b>	<b>Rf 200°C MPa</b>	<b>Rf 400°C MPa</b>	<b>Rf 600°C MPa</b>
0	2,42±3,23	3,33±8,16	1,79±7,92	0,64±15,27
5	2,43±1,42	3,64±14,16	1,79±18,71	0,45±21,33
10	3,42±7,58	3,38±5,21	1,65±10,85	0,63±15,26
20	2,26±12,15	1,59±1,27	0,89±15,17	0,48±52,69



Tabela A5 - Aderência (MPa).

<b>Graus</b>	<b>0% PCM</b>	<b>5% PCM</b>	<b>10% PCM</b>	<b>20% PCM</b>
20°C	13,69±0,04	7,96±0,08	4,14±0,04	1,27±0,00
200°C	10,83±0,05	5,73±0,05	2,55±0,07	1,27±0,00
400°C	5,41±0,04	3,18±0,05	1,27±0,00	1,27±0,00
600°C	0	0	0	0